昭和40年6月3日　第三種郵便物認可　平成21年9月10日発行（年6回1，3，5，7，9，11月の10日発行）富士時報　第82巻　第5号（通巻第858号）　ISSN 0367-3332

e-Front runners

富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

9
Sept. 2009

Vol. 82 No. 5

特集 未来を切り拓くオートメーション技術

富士電機グループ

富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

9

Sept. 2009

Vol.82 No.5

特集 未来を切り拓くオートメーション技術

目　次

特集 未来を切り拓くオートメーション技術

オートメーションが支える未来と人材育成 (1)
川田　誠一

オートメーション技術の現状と展望 (2)
松村　基史 ・ 黒谷　憲一

スマートエネルギーを実現するオートメーション (8)
大池　克幸 ・ 大橋　一弘 ・ 福山　良和

安全で安心なものづくりを実現するセーフティインダストリオートメーション (13)
斉藤 純一郎 ・ 垣塀　健 ・ 小林　益之

快適な社会を実現するグリーンソシオオートメーション (17)
川尻　幸一 ・ 平山　博之 ・ 笛木　豊

制御システムプラットフォームによる生産性と品質の向上 (22)
廣瀬　文彦 ・ 笹谷　俊幸 ・ 森　伸一郎

現場の安全を守る安全制御ソリューション (28)
小塙 明比古 ・ 長谷川 正美 ・ 金森　重晴

効率と品質の向上に寄与するモデリングと制御技術 (35)
勝野　徹 ・ 松本　宏治 ・ 松井　哲郎

安全・安心に貢献する放射線管理用機器・システム (42)
藤本　敏明 ・ 石倉　剛 ・ 伊藤　勝人

排ガスを監視する環境計測システム (49)
中村　裕介 ・ 金井　秀夫 ・ 平山　紀友

オートメーションを支えるインテリジェントフィールド機器 (54)
福住　光記 ・ 小高　秀之 ・ 中川　昌文

オートメーションを支えるワイヤレスネットワーク (59)
畠内　孝明 ・ 小林　芳邦 ・ 町田　潤一

インテリジェント化を支える MEMS センサ (64)
相馬　伸一 ・ 矢尾　博信 ・ 武居　正彦

解説 SIL，PFDavg，PFH，PL　冗長化設計 (69)

表紙写真

地球温暖化・少子高齢化などの社会的課題やグローバル化，競争力向上など企業の経営課題の解決にオートメーション技術の貢献が期待されている。富士電機は安全・安心で持続可能な社会の実現に向けて，エネルギーと環境・安全に注力した技術開発を進めている。スマート化，セーフティ化，グリーン化を三つの鍵とし，エネルギー，インダストリ，ソシオ分野に事業展開を行っている。

表紙写真はオートメーションのコンセプトを示し，風力発電安定化装置でスマート化を，タービンプロテクションシステムでセーフティ化を，レーザ方式ガス分析計でグリーン化をそれぞれ象徴している。

オートメーションが支える未来と人材育成

川田　誠一（かわた　せいいち）
産業技術大学院大学 教授

オートメーションの原点には，automationの字義通り人間の機能の代替化がある。すなわち，人の五感の代替となる情報獲得，人の判断と操作を代替する制御と最適化などがその原点にある。そして，人間機能の代替化から始まり，人の機能の限界を超えた機能を実現することでオートメーションは発展してきた。これを支えているのが20世紀後半から始まった情報通信分野の革新的発展である。現在，情報通信技術に支えられて，人間が扱いきれないほどの情報が有線・無線を通じて地球を飛び交い処理されている。このような情報通信技術がオートメーションを飛躍的に発展させてきたのである。

では，ますます発展するオートメーションにどのような未来が待っているのであろうか。その道筋は，21世紀に生きる我々が直面する課題を考えれば見えてくる。地球温暖化，先進国における少子高齢化，世界人口の爆発的増加と食糧危機，多発するプラント事故などの問題があり，課題は山積している。まず，少子高齢化については，労働生産性をさらに高めることが必要である。特に日本のサービス業の生産性向上は喫緊の課題であり，これに対するオートメーションの貢献が望まれている。しかし，地球規模の最大の課題は地球温暖化をどう食い止めるかであろう。環境問題の解決が最大のチャレンジである。そして，人々が安心して暮らせる安全な社会の実現が求められている。

まず，地球温暖化の課題解決を考える。国際的に合意されていることは，経済原則に則ってエネルギー問題を解決しようという努力である。排出するCO_2に規制をかけ，排出権を取引するルールが確立される。そして，この経済原則を支える新技術が求められている。その一つに，新しい産業分野を創出し雇用拡大につながるものとして着目されている“再生可能エネルギーの拡大”に寄与する技術がある。日本政府は今年2月に“低炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー普及方策について”提言を発表した。将来的には“バイオマス，太陽光，風力等のエネルギーでわが国の一次エネルギーの15～23％程度をまかなう必要がある”とされている。エネルギー問題は技術の問題であると同時に政治的，経済的な問題であり，文理融合型の問題解決を必要とする。自然法則に従う“ものづくり”と人間の都合を組み込む，いわゆる“コトつくり”が融合した知的でスマートなオートメーションを必要とする。

次に“安全・安心”について考える。プラントなどの産業事故発生原因件数の76％が人的要因で18％が設備的要因とするデータがある。集中力低下などによるヒューマンエラーが事故の原因に繋がっている。ここにオートメーションが活躍する場がある。さらなる自動化により安全を確保し，人々に安心をもたらす，そんな技術への期待は高い。特に，“安心”とは感性にかかわる言葉である。柏崎刈羽原発の例を持ち出すまでもなく，プラントの事故などがあるとわが国では“100％の安全”を求める声が高まる。一方，高い確率で安全が確保されれば科学的に安全であり，だから安心であると主張する国もある。“100％の安全”というのは“感性”が発する言葉であり“技術”の言葉ではない。だからこそ技術による安全の確保で人々に合理的に安心を感じてもらう，そのような努力が必要である。そのためには“安全”に関する国際標準を意識した戦略が意味を持つ。ある国だけで通用する安全基準ではなく，普遍性を持った合理的な安全基準が求められるのである。

このような，地球規模の環境問題の解決や，安全・安心社会の実現には，従来技術の延長だけには期待できないのであり，イノベーションが求められている。そして，未来のオートメーションを支える人材像は，顧客を含むステークホルダーが求めているもの，それも単なるニーズではなく潜在的要求を理解してイノベーションを担える技術人材である。私が所属する大学では，このような人材を“ものづくリアーキテクト”と定義し，主に社会人を大学院で再教育している。より高度な知識や技術を獲得するために，技術者が働きながら大学院で学ぶリカレント教育の重要性を認識した教育機関である。顧客の要求にどのように応えればよいか日々苦闘している技術者こそ新しい学びを求めている。その学びにはケーススタディを活用した教育，プロジェクトを中心に据えた教育（PBL：Project Based Learning）など，実践的で高度な教育が必須である。オートメーションの未来は新しい人材育成により大きな広がりを見せるであろう。

オートメーション技術の現状と展望

Current Status and Prospects of Automation Technology

松村　基史 Motofumi Matsumura　　黒谷　憲一 Kenichi Kurotani

富士電機は電力・産業をはじめ，さまざまな分野でオートメーション事業を展開し，多くの実績をあげてきた。わが国の技術戦略とグローバルな市場・技術の動向を踏まえ，安全・安心で持続可能な社会の実現に向けて，エネルギーと環境・安全に注力した技術開発を進めている。スマート化，セーフティ化，グリーン化を三つの鍵とし，エネルギー，インダストリ，ソシオ分野に事業領域を区分し，セーフティ技術，組込みシステムなどのプラットフォーム開発，ならびに３Ｒエンジニアリングの実現に向けた取組みを進めている。

Fuji Electric has expanded its automation business in various fields, such as for power and industrial applications, and has compiled a record of many successes. Based on our technical strategy for the Japanese market and on global market and technology trends, Fuji Electric is advancing technical development focused on energy, the environment and safety with the goal of realizing a sustainable society that is a safe and secure. With smarter functions, improved safety and greening seen as the critical factors for success, Fuji Electric has subdivided its automation business activities into energy, industry and socio-automation sectors, and is advancing efforts to realize safety engineering, platform development that includes embedded systems, and “3R”（reduce, reuse, recycle）engineering.

1　まえがき

富士電機は電力・水処理・交通などの社会基盤，鉄鋼・石油化学など素材産業，電機・電子など電動力応用，組立加工産業，ビルや商店舗などの分野において，最新の計測制御技術・情報技術の採用に取り組み，省力化・自動化，高効率化・高信頼度化を実現するオートメーションの事業を展開し，多くの先駆的実績を挙げてきた。現在，地球温暖化，少子高齢化，安全・安心の実現などの社会的課題やグローバル化・競争力向上など経営的課題の解決に貢献する次世代オートメーションの実現を目指し，エネルギーと環境・安全分野に注力し，技術開発を進めている。

2　オートメーション技術の現状と動向

2.1　国内の技術戦略

経済産業省が策定し，公開している技術戦略マップでは，重要技術の絞込みを行い，導入シナリオ，技術マップ，ならびに技術ロードマップを示している。その2009年版[(1)]の中の，オートメーション技術と大きなかかわりを持つエネルギー分野と計量・計測システム分野について述べる。情報技術（IT）については政府のIT戦略本部による「*i*-Japan戦略2015[(2)]」に基づいて述べる。

⑴　エネルギー技術戦略

エネルギー分野では，2006年に策定された「新・国家エネルギー戦略」や2007年の「クールアース50」計画を踏まえて次の五つの政策目標を設定した上で，これらに寄与する主な技術が抽出されている。

(a)　総合エネルギー効率の向上

(b)　運輸部門の燃料多様化

(c)　新エネルギーの開発・導入促進

(d)　原子力の利用

(e)　化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーン利用

(a)の中では，省エネルギー（省エネ）型産業プロセス（製鉄，石油化学など）が挙げられており，プロセス制御技術が貢献できる。また，次世代省エネデバイス［SiC（炭化けい素），GaN（窒化ガリウム）など］とともに高効率インバータが挙げられている。家庭・ビル・地域の効率的エネルギーマネジメントシステムは(a)(c)共通で挙げられている。(c)の中では，太陽光発電，風力発電，バイオマス発電などが挙げられており，これらの分散型電源との系統連携技術の重要性も示されている。(e)の中では，燃料電池，CO_2回収貯留技術などが挙げられている。

⑵　計量・計測システム分野の技術戦略

社会の安全・安心の確保および技術競争力の高度化を図ることを目的とし，新規計測機器開発の加速，計測機器利用技術の普及を目標としている。

計測機器に関するハードウェアおよびソフトウェア研究開発の具体的な課題および代表的なプロジェクトとして次の共通的なものが挙げられている。

(a)　新規センサ・新原理に基づく先端的計測機器の開発と世界市場への展開

(b)　現場ユーザ志向のソフトウェア内蔵・トレーサビリティ要件を保証する技術開発

(c)　不具合検査など生産現場への計測ソリューション提供

(d)　計量標準整備，標準化活動と認証方法

最重要技術課題として，例えば気体流量計測では高精度化，高信頼性化，高速化，ガス種範囲拡大，トレーサビリティ確保などが挙げられている。

⑶　IT戦略

情報技術に関する新たな戦略として，2015年を目指し

た *i*-Japan 戦略 2015 が策定された。2015 年のわが国においては，社会の隅々に行き渡ったデジタル技術が“空気”や“水”のように抵抗なく普遍的に受け入れられて経済社会全体を包摂する存在となること（Digital Inclusion），ならびにデジタル技術・情報により経済社会全体を改革して新しい活力を生み出すこと（Digital Innovation）を目指している。ここでは三つの柱が挙げられているが，その一つの“産業・地域活性化および新産業の育成”では，組込みソフトウェアの高機能化・高信頼化や，グリーン IT による低炭素化などが施策として挙げられている。

2.2　市場と技術動向

オートメーション技術に関係するグローバルな市場と技術について，最近の動向を述べる。

⑴　国際標準化

国際標準化への対応の重要性はますます高まっている。エネルギーや工業プロセスの計測制御分野の標準化は IEC の技術委員会の TC8 や TC59，TC65，TC95 などを中心に活発に進められている。電子化，ネットワーク化，工業用無線，さらにシステム視点での国際標準化も活発化しており，システム垂直統合やスマートグリッド対応などの技術に関心が寄せられている。工業用無線では HART Communication Foundation による WirelessHART，ISA（International Society of Automation）による SP100 の規格化が進められている。機械・機器の安全は ISO 12100（機械安全），IEC 61508（電気系の機能安全）を上位規格にして，さまざまな分野・機器の規格化が進められており，日本でも JIS 化され，これらの流れの中で安全計装などの導入は徐々に常識化されつつある。

⑵　生産・環境技術

エネルギーマネジメントについて，2010 年末を目標に品質マネジメントの ISO 9000 や環境マネジメントの ISO 14000 と同様な規格化が ISO 50001 として進められている。一方，RoHS〈注 1〉規制や鉛フリーなど，製品に対する環境規制が進んでいる。

⑶　センサネットワーク

人・モノの状況やそれらの周辺環境などをセンサが認識し，センサ同士の自律的な情報の流通を実現し，状況へのリアルタイムな対応を可能とするユビキタスセンサネットワーク技術に関する研究開発が総務省主導で行われている。これらを達成する技術として，無線，ネットワーク，MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサ，センサインタフェース，電池（または自己発電），それらの信頼性を損なわずして長期間動作させる方法などの課題解決に取り組まれている。

⑷　制御技術

1990 年代からロバスト制御やニューラルネットワークなどが，情報技術の進歩とあいまって，産業・社会分野や家電・車などに適用され，大きな効果をあげてきた。最近，応用面からは，連続系と離散系を統合的に扱うハイブリッド制御，より高い信頼性や可用性，安全性を実現するディペンダブル制御などの理論・方式が注目されている。

⑸　スマートグリッド技術

オバマ米大統領が掲げたグリーン・ニューディール政策の目玉の一つとしてスマートグリッドが注目されている。IT を活用した制御装置で電力の流れを供給側，需要側の双方から自動調整する次世代の送配電網である。専用機器やソフトウェアを送配電網の一部に組み込んで，電気を常時監視して電力の需要と供給がうまく釣り合うようにするもので，欧米，中国，日本など世界中で注目を浴びている。国により，電力インフラの前提条件も異なるため，課題や導入効果に対する見解はさまざまである。日本はスマートグリッドの要素技術の大国とも言われている。今後，太陽光発電の一般家庭への普及など，分散型電源の拡大に伴い，配電系統のきめ細かな制御を行うための計測センサ，制御端末や次世代配電系統の制御技術の開発が注目されている。

2.3　需要動向

エネルギー・環境関連市場は中国をはじめアジアでの需要拡大が予測されている。日本でも環境・省エネ関連市場は年平均 8% 前後で拡大し，2020 年には 15 兆円規模に達するとみられている。スマートグリッド関連市場の成長も急激で 2014 年には 200 億米ドル規模とも報じられている。セーフティ・セキュリティは中近東，中国やインドなどアジア地域での拡大が予測され，10% 前後の高い成長が見込まれている。このように環境・省エネや安全・安心に関連する市場は国内外で今後とも持続的な成長が見込まれており，オートメーションが担う役割は大きい。

3　富士電機が目指すオートメーション事業

3.1　お客さまの課題とニーズ

お客さまの中でも，とりわけ製造業を取り巻く事業環境の変化により，課題とそれに伴うニーズは次のように変わってきている。

⑴　グローバルな生産環境への対応

製造業は必要な市場へのタイムリーな供給が求められ，有望な市場の近くに製造拠点を配置するとともに，人件費などのコストの低い国・地域への製造拠点の統合が進んでいる。これらに対応して，分散拠点の統合管理やグローバルなサプライチェーンマネジメント，セキュリティ，知的財産保護などの技術が重要となっている。

異なる文化を持つ人材が混在することにより，作業標準化や作業履歴管理，ならびに従来以上の現場設備の安全設計が求められる。

⑵　資産活用の最適化

需要，景気，為替の変動やニーズの変化などの市場リスクに，柔軟に対応する生産体制が求められており，生産拠点・ラインの構築，変更，移転を短期間・最小費用で実現

〈注 1〉RoHS：電気電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についての EU（欧州連合）の指令

する必要がある。そのため，設備のモジュール化・汎用化・可搬化が進んでいく。

これらに対応して，複数拠点間の物流も含めたグローバルなシミュレーション，製造工程の精緻（せいち）なシミュレーション，現場機器の省配線・無線化，設備をつないだだけで動作するプラグアンドプレイ機能を持った機器などが求められる。

⑶　投資リスクの低減（高稼動率，安全化）と製品安全

現場設備はますます高い稼動率が求められており，事故や設備の故障に伴う運転停止・機会損失を最小化することが必要である。そのために，高い信頼性や安全性が求められるとともに，故障する前に対策を打てるよう，異常兆候の早期発見や将来予測が期待される。さらに，従来の信頼性に加え，システムとしての可用性の向上，耐故障性なども含めたディペンダブルな設計技術が求められる。

製品の安全性確保はさまざまな事例を持ち出すまでもなく，企業の存続にかかわる最重要なリスクである。とりわけ，食品・薬品などの場合は不良品の排除はもちろんのこと，異物・微生物など混入の検査の高度化や原材料から製造，流通までのトレーサビリティ確保が求められる。

⑷　人材流動化と技能維持

わが国における団塊の世代や米国などにおけるベビーブーマ世代が退職年齢を迎え，わが国の終身雇用制も崩壊しつつあり，人材の流動化が進んでいる。また，景気の波などによる物量の変動にフレキシブルに対応するため，定期社員や派遣社員の比率が増大している。さらに，欧米のみならず，わが国でも若年労働力不足・グローバル化から外国人労働者の雇用が増えている。

これらに対応するには，短期間の教育で作業に従事できるような役務の単純化や熟練者でなくとも容易に操作可能で安全な設備・機器などが必要となる。設備側に自己診断や機能安全などのインテリジェンス性を持たせ，作業者を補助する。さらに，作業者の健康・意識状態を監視し安全性を確保することが求められる。

⑸　環境社会への対応

地球温暖化抑制やゼロエミッション，そのための一つの解答である電気自動車（EV：Electric Vehicle）社会への対応が求められている。そのために，設備・機器の低消費電力化・小型化や運用効率の定常的な監視・改善が必要である。また，有害物質規制（大気汚染防止法，水質汚濁防止法，RoHS，REACH[注2]など）への対応で，事業所の排出するガスや排水中の低濃度・微量の有害物質成分の測定が必要となってくる。EV社会においては，安全で高効率な駆動制御技術とともに，急速充電スタンドのようなインフラの整備も課題である。

3.2　三つの鍵

図1にオートメーションを構成する機器の進歩を，横軸に入出力処理速度，縦軸に機器に搭載される記憶容量で示す。電子技術，ソフトウェア技術の進歩は急速でシステム構造の変化も目覚しいものがある

図2に富士電機のオートメーション事業の取組みを示す。同図の上段に示すようにリスク分散や高機能化に伴う構成機器の物理的分散や自律化が進んでいる。一方で，運用面やエンジニアリング・サービス面ではシームレスな統合環境が求められている。プロセスや生産を“より見える化”し，運用・操業を“より快適で安全”に実現することで，経営競争力向上に貢献するソリューションがこれからのオートメーションである。これを目指して，富士電機はセンサからシステム構築まで①スマート化，②セーフティ化，③グリーン化を鍵として技術開発・商品化を進めている。

スマート化はセンシングの高性能化，最適化などの高度情報処理，業務・運用の効率化・省エネ化などを意味する。セーフティ化は冗長化による高信頼システム，高信頼度設計・安全設計，国際規格に対応した機能安全システム提供など，安全・安心を確保する取組みである。グリーン化は環境負荷の計測，高度監視，環境規制対応・省資源化など，環境対応の取組みである。

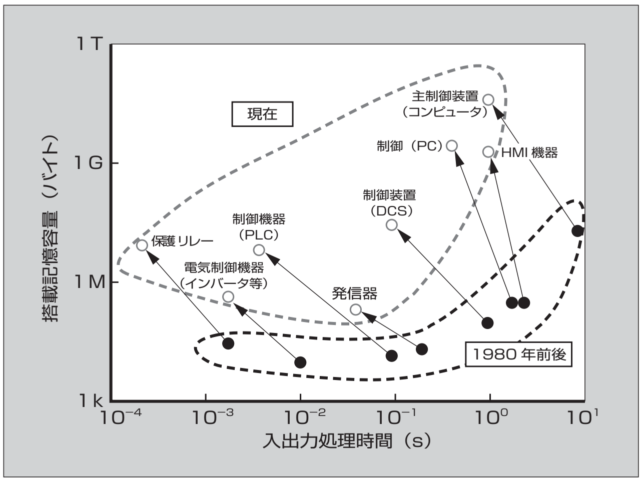
事業領域としては，電力・ガス・石油などのエネルギー分野，食品・化学・鉄鋼・電機・機械などのインダストリ分野，農業・物流・サービス・商業・公共などのソシオ分野に区分している。上記の三つの鍵はこの三つの分野それぞれに重要であるが，とりわけ，エネルギー分野にはスマート化が，インダストリ分野にはセーフティ化が，ソシオ分野にはグリーン化が最重要と位置付けて技術開発を進めている。

3.3　オートメーション技術の取組み

⑴　セーフティ技術

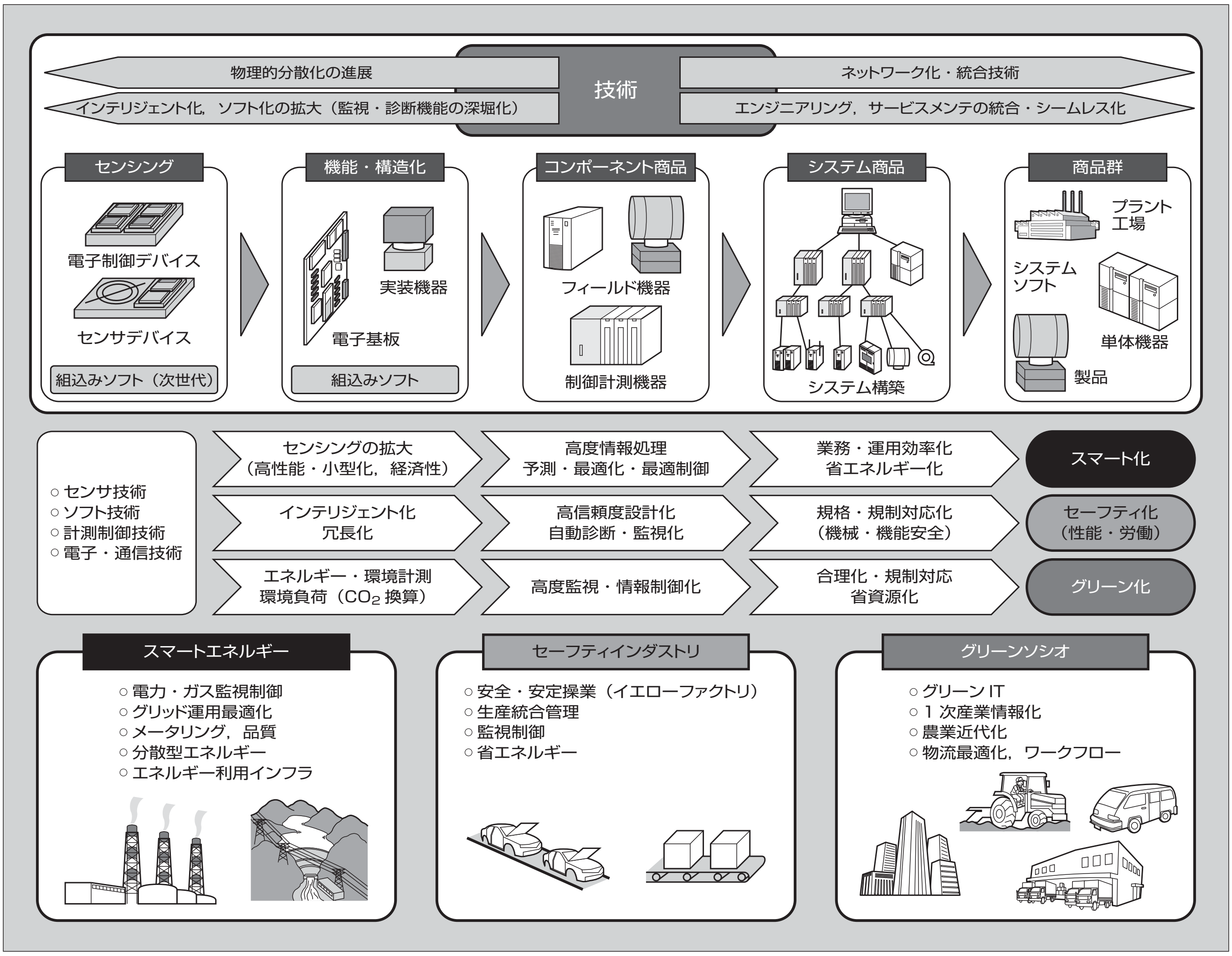
富士電機は電力・公共設備や工場など，プラントの安全制御システムやそれを制御するシステムそのものの高信頼度化には以前から取り組んできた。また，センサ技術によるプラントや機器の異常診断などでも多くの取組みを行っ

図1　オートメーションシステム構成機器と技術進歩



〈注2〉REACH：化学物質の登録，評価，認可及び制限に関するEU（欧州連合）の規則

図 2　オートメーション事業の取組み



てきた。さらに，情報制御システムのセキュリティ管理などにも多くの実績を持っている。これらに加えて，機械安全・機能安全の規格や規制に対応できるエンジニア育成や商品提供の取組みを強化している。国際規格に準拠した安全技法による開発やリスクアセスメントに基づく安全システム設計を富士電機の提供するすべての商品に適用する活動を行っている。

⑵　プラットフォーム開発

業種，組織，機種で固有に開発し，結果的に開発期間の長期化，属人的な開発による技術の停滞，効率低下を招いていた。これに対し，技術基盤の共通プラットフォーム化（横断的開発・技術基盤化）を進めている。プラットフォーム化により，開発プロセス・技術の共通化・標準化，ソフトウェア・ハードウェアの標準部品化を図り，先端技術への共通的な取組み，技術蓄積を行っている。これらにより，開発期間の短縮，技術の高度化，品質の向上をよりいっそう進めていく。

⑶　組込みシステム技術

あらゆる電子機器にはソフトウェアが組み込まれている。しかも，開発規模は増大の一途をたどり，その開発の効率化・高品質化は重要である。このため，組込みシステムもハードウェア・ソフトウェアのプラットフォーム化を図り，開発手法・開発プロセスの標準化と部品化を進めている。

⑷　3R エンジニアリング

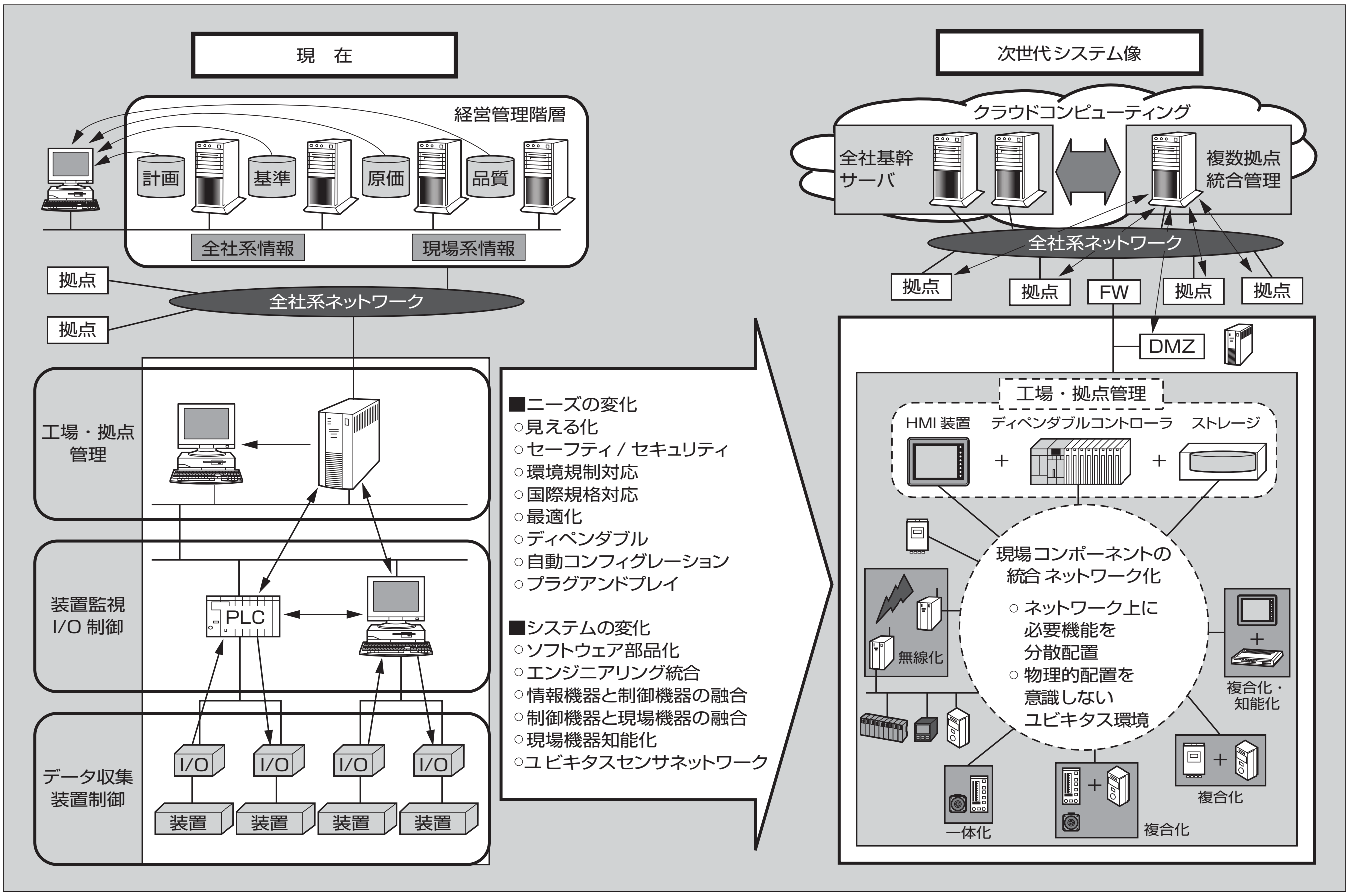
制御システムを構成するコントローラ，コンピュータ，HMI（Human Machine Interface）機器などのエンジニアリング，ならびにソフトウェア開発の共通プラットフォーム化と統一エンジニアリング環境による業務効率化を進めている。これにより，設計・開発の作業量の削減（Reduce），設計資産の再利用（Reuse），部品化などの再資源化（Recycle）を推進している。これを，富士電機では“3R エンジニアリング”と称している。

⑸　制御技術

機器やプラントの省エネ化，セーフティ化を図る上で，最適化や予測，診断を実現する制御技術は核となる技術であり，富士電機は以前からコア技術として取り組んできた。その中で，1 入力 1 出力系の PID 制御技術，多変数系のモデル予測制御技術をプラットフォーム化するとともに，制御技術者の人材育成に取り組んで，適用技術のレベルアップを図っている。このほか，非線形最適化技術や多変量統計的プロセス管理技術に重点的に取り組んでいる。

⑹　MEMS・センサ技術

図 3　次世代オートメーションシステム構成



制御系を構成するセンサ，アクチュエータ自体の省電力化，省資源化も重要であり，これを実現するのに，電気回路と機械系が一体となったMEMSデバイスは有効な手段である。富士電機は20年以上にわたり，MEMS技術に取り組んできており，計測機器，放射線センサ，ガス分析センサなどの小型化・省電力化で大きな効果をあげてきた。最近では，ガス漏れを検知するガス警報器に内蔵しているメタンガスセンサ，設備や建築物などの異常や異常兆候の検出および健全性の診断などを行うための振動センサなどの開発を行っている。

⑺　ネットワーク技術・無線技術

制御系ネットワークについては，フィールド機器からコントローラ，コンピュータまで含めたエンジニアリング環境の垂直統合を目的に，各ネットワークレベルでの情報透過の仕組みを実現する開発を進めている。具体的には，コントローラレベルでのEthernet/IP，統合エンジニアリングのためのFDT/DTM（Field Device Tool/Device Type Manager）技術適用を進めている。

無線については近距離用の特定小電力無線と広域用のメッシュネットワーク無線のプラットフォーム化を進めている。併せて，無線ネットワーク適用のエンジニアリング技術の標準化や干渉回避技術により，通信トラブルの低減を図っている。

4　今後の展望

経済産業省の委託を受けて，2008年に関係学会が中心となって横断的な学術に対する未来像を議論し，四つのテーマについて，2010～2040年程度をターゲットとしてアカデミック・ロードマップ[3]がまとめられた。このうち，WG1（制御・管理技術分野）では，ニーズとして安全・安心社会の構築，環境問題へのアプローチが最重要課題として挙げられ，シーズとして“複雑化する対象・複雑化するシステム”技術を挙げている。このシーズに対して，理解・解析し，また制御を行おうとするためにはさまざまなレベルで対象・システムの状況を観測し“見える化”する必要がある，と述べられている。ただし，見える化は単に“測る”ことだけではなく，データを“整理統合”し，“人に提示する”，3要素が重要であり，それぞれが密接に関係しながら発展する必要がある。

これらも参考に，現状のニーズと情報制御技術の進歩を踏まえて，富士電機の考える近い将来の次世代制御システムの実現例を**図 3**に示す。

5　あとがき

わが国の技術戦略とグローバルな市場・技術の動向を踏

まえて，富士電機の目指すオートメーションの事業と技術について取組みと展望を述べた。

地球温暖化の抑制に向けて，全世界で CO_2 換算での温室効果ガス排出量を，1990 年レベルに対し，2050 年には 50% 以上削減することが必要とされている。われわれの現在の生活レベルを維持しながら，これを実現するためには，さまざまな面での対策・施策が必要となるが，オートメーション技術が，貢献できる可能性は非常に大きい。また，社会の安全・安心を確保する上でも，オートメーション技術に期待されるものは非常に大きい。

富士電機は“エネルギー・環境”を事業の軸に，安全・安心で持続可能な社会の実現に向け，オートメーション技術をそのよりどころの一つとして，貢献していく所存である。

参考文献

(1) “技術戦略マップ2009”. 経済産業省.
http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2009.html,（参照 2009-08-26).

(2) “*i*-Japan戦略2015～国民主役の「デジタル安心・活力社会」の実現を目指して～”, IT戦略本部.
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/090706honbun.pdf,（参照 2009-08-26).

(3) 横断型基幹科学技術研究団体連合ほか. “学会横断型アカデミック･ロードマップ報告書”. 経済産業省,
http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/19fy-pj/19fypj.html,（参照 2009-08-26).

特集

松村　基史

電力・エネルギー分野の制御エンジニアリングに従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部長。電気学会会員，CIGRE 会員，計測自動制御学会会員。

黒谷　憲一

情報制御システムの研究開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部兼技術開発本部技師長。技術士（情報工学部門）。電気学会会員，計測自動制御学会会員。

スマートエネルギーを実現するオートメーション

Automation for Realizing “Smart Energy”

大池　克幸 Katsuyuki Ooike　**大橋　一弘** Kazuhiro Oohashi　**福山　良和** Yoshikazu Fukuyama

低炭素社会やエネルギーの安定供給の実現に当たり，エネルギー利用の高効率，高品質，高信頼度を目指すスマート化へ期待が向けられている。富士電機は，長年にわたりこのエネルギー課題に取り組み，技術開発，製品開発を通し貢献してきた。分散型エネルギー需給の制御では太陽光発電，風力発電，バイオマス発電を組み込んだ地域需給制御の研究開発に参画した。分散型電源システムでは電力安定化装置を開発し，適用した。系統運用では潮流制御で系統の安定化を図り，エネルギープラントでは最適化と見える化を進め，エネルギーの高品質化に貢献している。

In order to realize stable supply of energy toward low carbon society, “Smart Energy” aiming more efficient, quality and reliable energy usage is eagerly expected. Fuji Electric has challenged these energy issues for many years, and has made positive contributions through technology and product development. With regards to supply and demand control of distributed energy, Fuji Electric has involved in the research and development project of regional supply and demand control that incorporates photovoltaic, wind power and biomass generation. For distributed power supply systems, electric power stabilizers have been developed and used in practical applications. For power system operation, we have realized system stabilization with power flow control, and for energy plants, we have realized optimal operation and visualization. Consequently, in energy field, we have contributed to realization of higher quality energy.

1　まえがき

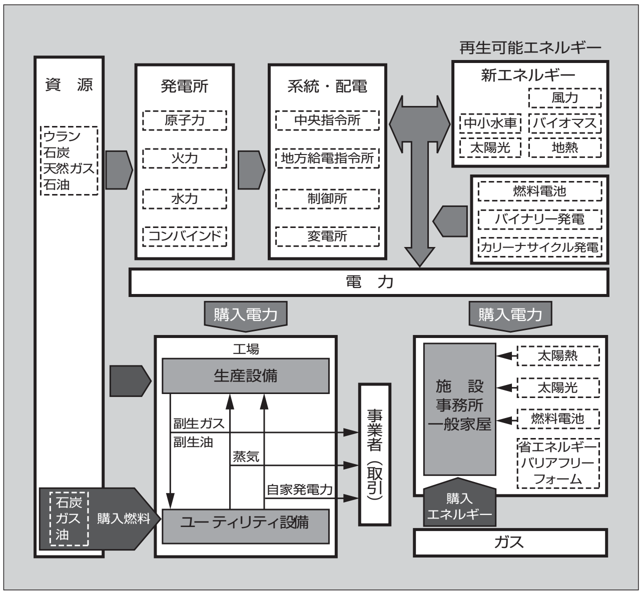
地球温暖化問題は人為起源の温室効果ガスの増加が原因とされ，自然の生態系および人類に深刻な影響を及ぼすものである。既に世界の排出量は自然界の吸収量の 2 倍を超え，その予想される影響の大きさや深刻さから見て，最も重要な環境問題であり，低炭素社会の実現が急がれている。

世界のエネルギー需要もアジアを中心とする開発途上地域で大幅な増加が見込まれている。世界全体では 2030 年で 45％増（2006 年比）の見通しにある(1)。このような背景から，“エネルギーと環境”問題について気候変動枠組条約（UNFCCC）を軸に各国さまざまな取組みが行われている。

日本では，この課題克服に向けて，エネルギーの安定供給，環境保全，経済性の 3E（Energy，Environment，Economy）の同時達成を目標としており，エネルギー利用の高効率，高品質，高信頼度を目指すスマート化への取組みに期待が寄せられている。

図 1 にエネルギーフローの概要を示す。富士電機は石油，天然ガスなどに代表されるエネルギーの資源利用から電力や熱などのエネルギー需給分野の全般にわたり，スマート化に向けたオートメーションを展開している。本稿では，富士電機の目指すエネルギーのスマート化“スマートエネルギー”を実現するオートメーションについて紹介する。

図 1　エネルギーフローの概要



2　エネルギーの高度利用に向けた要求と課題

3E の同時達成を目標とする国のエネルギー政策は，環境整備面，制度面，技術面での課題を明らかにしながら総合的な視点で進められている。中でも化石燃料の安定供給，有効利用や，省エネルギー（省エネ）や新エネルギーの導入が推進されていたが，近年ではさらなるエネルギー利用・運用の高度化にも注目が集まっている。

富士電機はこの高度化の要件を，高信頼性化，高効率化，環境，安全・安心ととらえ，その実現に向けて設備・コンポーネントからシステムに至る顧客指向型の総合的なエネルギーのオートメーションを展開している。**表 1** に，エネルギーのスマート化に求められる要件を示すとともに，以下に概説する。

(1)　高信頼性化，高品質化，安定化

技術の進歩により，設備・コンポーネントの信頼性は格段に向上し，エネルギーの安定供給・利用は当然のことであると需要者は受け止めている。今後も継続して信頼性の維持・向上を図ることが重要である。

表１　エネルギーのスマート化に求められる要件と技術課題

要　件	技術課題	
	設備・コンポーネント	システム
高信頼性化 高品質化 安定化	○ センサ，計測装置による測定点の拡大 ○ 余寿命診断，予防保全 ○ パワーエレクトロニクス・MEMS などを用いた半導体化	○ 広域分散型バックアップ ○ IP ネットワークのセキュリティ ○ 分散電源の系統連系，電力安定化 ○ 障害対応の迅速化 ○ 事業所内の電気・熱・蒸気などの各種エネルギーの安定供給
高効率化 高性能化	○ 発電所における蒸気条件の超臨界化，コンバインドサイクル化，石炭ガス化 ○ 磁性材料の低ロス化による変換効率向上 ○ 電子デバイス，光，超電導 ○ コンパクト化，軽量化（ガス絶縁技術） ○ 高経年期対応	○ 送配電損失の低減：ロスミニ制御，高電圧化 ○ 事業所内の電気・熱・蒸気などの各種エネルギーの最適運用 ○ 生産プロセスにおける省エネルギー，エネルギー回収 ○ 履歴管理 ○ 化石エネルギー採掘の省エネルギー・採掘量最大化 ○ ISO 50001
環境，安全・安心	○ 安全規格対応 ○ CO_2，NO_X，SO_X 対策	○ 安全計装 ○ 見える化 ○ ISO 14001 ○ 分散電源の導入への対応

⇩

運用・利用の高度化	○ エネルギーマネジメント ○ スマートグリッド ○ マイクログリッド ○ スマートファクトリ ○ スマートマイニング ○ ICT（高速・大容量情報通信システム , クラウドコンピューティング）

システム面では，広域に分散配置されたシステム間の監視制御や IP ネットワーク利用による高信頼性化が重要である。また，導入が促進されている分散型電源では出力変動が影響して，系統内の潮流や電圧の変動が増大することが考えられる。このため，系統連系技術，電力安定化技術などのスマート化がますます重要となる。

工場や事業所内の生産プラントへのエネルギー供給では，プラントの電力・蒸気などの消費エネルギーの変動に合わせ，購入電力やユーティリティ設備からのエネルギーを安定・安全に供給することも重要である 。

⑵　高効率化，高性能化

エネルギーの高効率化として，省エネルギー，リサイクルエネルギーの活用技術，高効率エネルギー利用技術などが重要である。中でも，省エネでは，高効率機器や省エネ対策機器の適用とともに，気流解析や生産性を損なわない各種プラントの制御技術を応用した対策が必要である。

また，高効率エネルギー利用としてエネルギーロスの削減に向けた設備の導入や，限りある化石燃料をできるだけ無駄なく，効率的に採取・利用する技術が求められる。電力分野では，潮流最適化による系統運用が重要となる。

⑶　環境，安全・安心

CO_2 削減，NO_X，SO_X 対策や再生可能エネルギーの活用，環境適合材料の使用などの積極的な取組みが重要であり，エネルギーセキュリティやライフサイクル全体での視点が不可欠である。エネルギー機器，システムにおける安全への対応にも積極的に取り組んでいる。

⑷　運用・利用の高度化

近年，運用・利用の高度化による視点において，新しい取組みが脚光を浴びている。

電力分野では，発電事業者の発電施設から，送電，変電，配電そして個別の需要家（企業や工場，一般家庭）に至るまで，ICT（Information and Communication Technology）を積極的に活用して，運用の高度化を目指した“スマートグリッド構想”が立ち上がっている。

分散型電源などを導入し，コスト低減や地産地消を目的とした離島など特定地域におけるマイクログリッド化や，工場におけるスマートファクトリ化の取組みが進められてきている。また，工場廃熱の他工場や民生部門への融通，熱の地域流用，複数需要者間でのエネルギーの融通，共同利用なども進められてきている。

これらの実現のためには次に示す二つの技術の確立が重要である。

(a)　スマートエネルギー対応技術

① 配電系統を中心とした次世代配電自動化システム技術

② 再生可能エネルギーとの協調技術（電力品質計測・状態把握，系統解析技術，需給制御技術，蓄電池連携技術など）

③ 熱や蒸気などのエネルギーの発生と消費に対する需給連携制御技術

④ エネルギー利用の改善や市場取引支援などに関するエネルギー管理技術

⑤ ネットワーク制御型端末“スマートメータ”の利用技術

⑥ 広域多地点同時計測システム化技術

(b)　情報通信技術

① 基盤技術としての高速・大容量の情報通信技術

② コンピューティングシステム技術

3　富士電機の取組み

富士電機は長年にわたり，このエネルギー利用の課題に取り組み，技術開発，製品開発を通して貢献してきた。培ったエンジニアリングノウハウを生かし，スマート化に向けたオートメーションについて紹介する。

3.1　電力分野の高度化技術

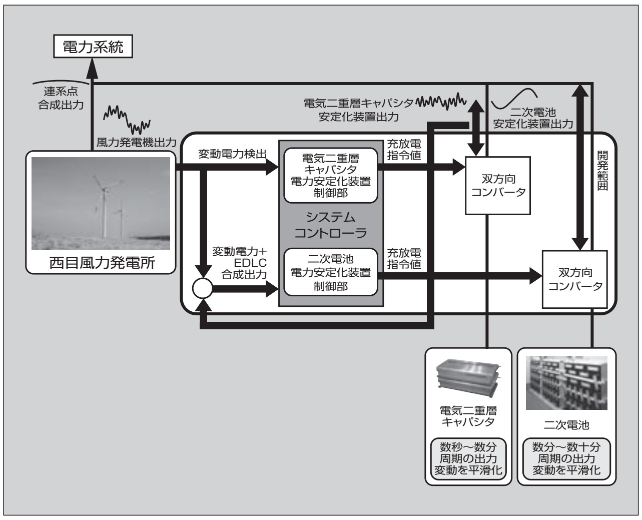
⑴　分散型エネルギー需給制御

複数の分散型電源によるマイクログリッドなどのエネルギーシステムについては，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO 技術開発機構）の委託事業“新エネルギー等地域集中実証研究”へ参画し，太陽光や風力などの自然エネルギー発電と，バイオマス発電，および二次電池からなる分散型エネルギーを安定的に需給制御し運用管理するハイブリッド技術を確立した[2]。また，国内外における，さまざまな地域エネルギー事業 FS（フィージビリティスタディ）調査にも参画している。開発途上国における温室効果ガスの排出削減などの課題解決に向けた取組みも行っており，地域創発型の分散型エネルギーシステムによる地域活性化を支援している。

⑵　電力安定化制御

分散型電源を安定したエネルギー源として利用することを狙いとして，富士電機は十数年前から電力貯蔵技術に取り組み，超高速フライホイールやレドックスフロー電池などの電力貯蔵装置を用いた安定化制御技術を開発してきた[3]。最近ではキャパシタと蓄電池によるハイブリッド型の電力安定化装置を開発している。電力安定化装置は，二次電池などの電力貯蔵装置，インバータ，システムコントローラで構成され，電力貯蔵装置の充放電により，分散型電源の出力変動を打ち消すものである。**図 2** にキャパシタと二次電池による風力発電用ハイブリッド型電力安定化装置の構成を示す。可変時定数制御など最適な充放電制御方式を採用し，富士電機 100% 出資により設立された株式会社ウインパワーの風力発電サイトにおける実証試験では，風力発電定格出力比 30% の電力安定化装置により，20 分間において最大出力変動幅 10% 以下の時間の割合を 90% 以上とすることができた。

図 2　風力発電用ハイブリッド型電力安定化装置の構成



⑶　系統運用の最適化

再生可能エネルギーなどの分散型電源は，計画的な出力制御が困難なため，**図 3** に示すように系統連系に際して種々の制約を受ける。例えば現状のシステムでは線路途中での電圧上昇，電力の逆潮流などの支障が起きる可能性がある。富士電機は，これらの課題に対して，放射状配電系統に特化して計算速度が速く収束性のよい BFS（Backward-Forward Sweep）法を用いた高速潮流計算手法[4][5]や，限られた情報（例えば計測設備などの情報）から配電系統全体の負荷量，電圧，潮流状態を推定する状態推定手法[6]などの独自の技術を開発し，事故時復旧システム，電圧・無効電力最適制御システム，分散型電源連系審査支援システム，配電系統電圧管理システムなどの分散型電源対応のシステム開発と適用検討を進めている。

潮流計算は状態推定をはじめ種々の分散型電源対応システムで用いられ，一回の処理で数千回実行されることもあり，高速性が求められる。BFS 法は，配電系統が放射状であるという特性を生かし，上流からの逐次計算と下流からの修正を交互に行うことにより，高圧系統で一般的に広く利用されている Newton-Raphson 法と比較して，約 10 倍の高速計算が可能という特長がある。

⑷　スマートメータ

エネルギーの運用・管理の高度化のためには，エネルギーの利用状況や品質情報をリアルタイムに“見える化”できることが重要である。

富士電機では 1970 年代より，PLC（Power Line Com-

図 3　分散電源の導入を支援する系統運用技術

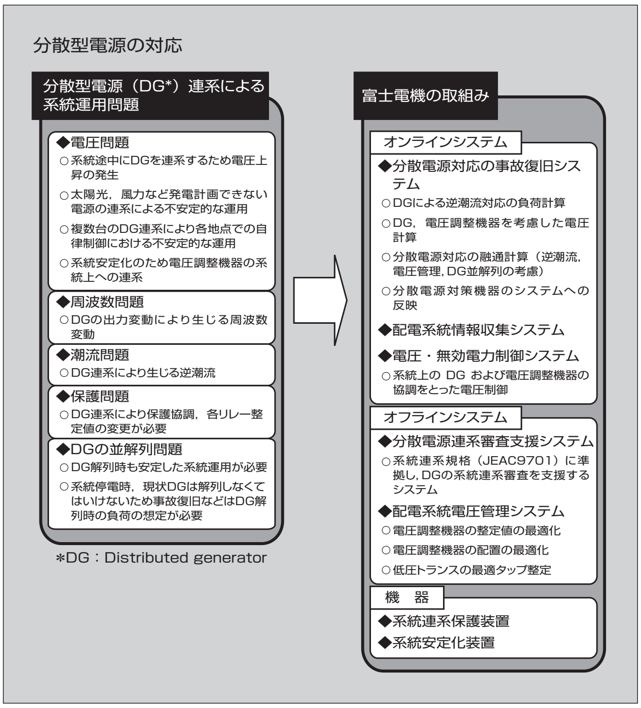
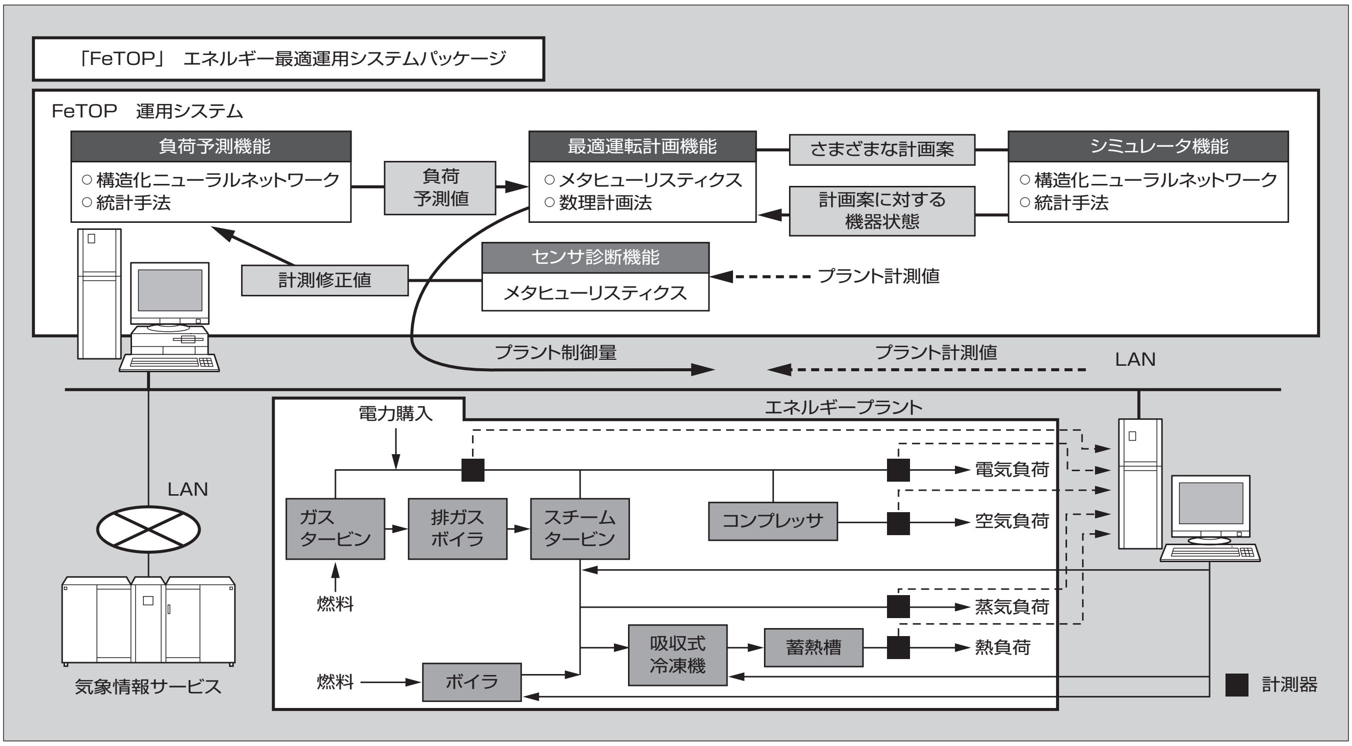


図 4 「FeTOP」のシステム構成例



munication），電話回線，光ファイバなどの有線や，携帯電話網や近距離無線（Bluetooth[注1]，特別小電力）などの無線を利用した自動検針，負荷制御，停止/解除処理などに取り組んできた。

今後はさらに ICT を駆使し，ネットワーク安定性確保のための計測機能，デマンドレスポンス機能などの開発を行い，配電系統と各需要家とのインタフェースをつかさどるネットワーク制御型のメータとしての展開を進めていく。

3.2 エネルギー利用の“最適化”と“見える化”

石油・ガスに代表されるエネルギー資源の有効活用，省エネに向けた設備の効率化運転や監視制御，さらにエネルギー供給の安全・安心の確保について，富士電機は各種プラントの制御技術や情報技術を応用し幅広くソリューションを提供している。その主な例を次に示す。

エネルギー資源の有効活用では，天然ガスの生産能力の低下を防止するための高圧二酸化炭素注入制御技術や，採取設備の井戸元高圧ガスバルブ制御技術などが挙げられる。また，原油の汲出しポンプの運転効率向上の制御方式確立や井戸設備としての最適化に取り組んでいる。有効利用の側面では，液化天然ガス基地の気化器の最適スケジュール運転制御や，都市ガスの効率的な生成に向けた制御技術がある。

エネルギーの安定・安全な供給では，パイプライン設備（都市ガス供給網，天然ガス，航空機燃料）の遠隔監視制御システムを多数納入している。

一方，比較的消費量の多い工場設備などのエネルギーを削減することは，温室効果ガスを低減する上で特に重要である。工場で生産・副生・購入するエネルギーのコストミニマムを達成するため，次に示す高度な自動化運転が進んでいる。

(a) 排ガスを超低酸素で燃焼させるボイラ制御
(b) 受電デマンド契約料，自家発電量や生産設備への蒸気安定供給を実現する受電・発電の最適制御
(c) 副生エネルギーを有効利用するためのボイラ優先燃料自動制御
(d) 各火力発電所の効率特性を考慮した最適負荷配分制御
(e) コストミニマムを実現する生産設備への蒸気最適ルート制御

なお，これらのエネルギー低減制御は総合的に実施されると効果が高く，構造化ニューラルネットワークやメタヒューリスティック最適化手法を適用した予測・最適化・シミュレーション技術によって実現している。

また，富士電機は，負荷予測，最適運転計画とシミュレータ機能により，ユーティリティ設備を最適制御が可能なパッケージソフト「FeTOP」を開発している。FeTOP のシステム構成を**図 4** に示す。

従来は，運転員が経験をたよりに，裕度を考慮して運転を行っていた。FeTOP では各プロセスデータにより各種エネルギー（電力，蒸気，熱）などの予測を行う。最適なユーティリティ設備の運用方法をシミュレータおよび最適化機能により自動計算と制御を行うことにより，実プラントにおいて従来比約 10% の省エネを実現している[7,8]。

さらに，産業分野を対象に，エネルギーの“見える化”をキーワードに，各種計測機器やセンサと監視システムを

〈注 1〉Bluetooth：Bluetooth SIG, Inc. の商標または登録商標

統合し，エネルギー情報の一元管理を実現するエネルギーマネジメントシステム「Main Gate」を提供している。省エネ管理に必要なエネルギーの運用分析，設備稼動分析，品質傾向解析などの機能を豊富に備えている。

3.3　安全への取組み

近年，プラントや設備のリスクの大きさを基に，安全装置のリスク軽減率の要求レベルである安全度水準（SIL：Safety Integrity Level）という定量的な尺度を用いて，リスクと投資金額を決定する仕組みが要求されている。富士電機は，このような安全計装システムの適用を積極的に推進している。

4　あとがき

地球規模の課題であるエネルギー問題はその需要の増大に対し，資源の有効活用や環境問題などの解決を進めながら，国際協調の中でエネルギー全体の安定供給化と削減を目指すものである。注目すべき動向として，EMS の国際規格（ISO 50001）の 2010 年末に向けた制定や，電力のスマート化に向けた各種標準化仕様などがある。富士電機は，今後もグループの技術力を結集し，グローバルに進む市場環境や新技術の変化に応じた研究・開発を進め，さらなる高度化を目指したオートメーションの提供に努力をしていく所存である。

参考文献

(1)　OECD/IEA World Energy Outlook 2008.

(2)　伊原木永二朗ほか. 分散型エネルギーシステムを支える技術. 富士時報. 2005, vol.78, no6, p.423-430.

(3)　神通川亨. 風力発電出力変動抑制への応用. 平成21年電気学会全国大会. エネルギー貯蔵装置の分散型電源への活用（太陽光発電, 風力発電, マイクログリッドなどへの活用）シンポジウム. 6-S7-4. 2009-3.

(4)　Fukuyama, Y. Hsaio-Dong Chiang,. “Fast Distribution Power Flow Using Multi-Processors”, Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1996, vol.18, no.5, p.331-337.

(5)　Naka, S. et al. “Practical Equipment Models for Fast Distribution Power Flow Considering Interconnection of Distributed Generators”, Panel on “Challenges on Distribution systems”, IEEE PES Summer Meeting 2001.

(6)　Naka, S. et al. “A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation”. IEEE Tans. On Power Systems, 2003, vol.18, no.1, p.60-68.

(7)　項東輝ほか. 原動力設備プラントの最適運用と適用事例. 富士時報. 2004, vol.77, no.2, p.166-170.

(8)　福山良和, 戸高雄二. ユーティリティ設備の最適運転による省エネルギー. 計測と制御. 2006-10, vol.45, no.10.

大池　克幸

エネルギーソリューションシステムの技術企画，システムエンジニアリングに従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エネルギーシステム統括部長。電気学会会員。

大橋　一弘

エネルギーソリューションシステムの技術企画，システムエンジニアリングに従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エネルギーシステム統括部副統括部長。電気学会会員。

福山　良和

計測・制御システムの研究開発業務に従事。富士電機システムズ株式会社技術開発本部制御技術センター長。工学博士。電気学会会員，IEEE 会員，計測自動制御学会会員。

安全で安心なものづくりを実現するセーフティインダストリオートメーション

Safety Industry Automation for Realizing Safe and Secure Manufacturing

斉藤 純一郎 Junichiro Saito　　垣堺　健 Ken Kakizakai　　小林　益之 Masuyuki Kobayashi

富士電機は，従来の高信頼度化・高品質化などの安全技術に加え，国際安全基準を満たした当社独自の安全ソリューションの提供を目指している。安全ソリューションはエネルギーオートメーション，インダストリオートメーション，ソシオオートメーションの三つの分野をカバーし，お客さまの生産設備・システムをライフサイクルにわたり安全に稼動するように構築・維持する。安全ソリューションはコンサルティング，安全制御ソリューション，安全コンポーネント，アフターサービスなどの商品で構成され，“安全・安心なものづくり”を行うセーフティインダストリの実現を支援している。

Fuji Electric aims to supply proprietary safety solutions not only that provides the traditionally requested safety technology such as higher reliability and higher quality but also that meet international safety standards. The safety solutions encompass the three fields of energy automation, industry automation and socio-automation, and customer manufacturing facilities and systems are constructed and maintained by them so as to operate safely throughout their lifecycle. The safety solutions consist of consulting, safety control solutions, safety components, after-sales service and the like, and support the realization of a safety industry for “safe and secure manufacturing.”

1 まえがき

近年，機械装置やプラントでの重大事故が増加しており，安全・安心への社会的関心が世界的に高まっている。

また，さまざまな企業活動において“企業の社会的責任”が重視され，安全・安心に関する要求が厳しくなるとともに，プラントや機械設備を対象とするセーフティインダストリオートメーションの需要が拡大している。本稿では，セーフティインダストリの新しい姿と富士電機の取組みについて述べる。

2 セーフティインダストリの現状

安全技術は，国際的にはISO/IEC規格上で整備されている。欧州では，すべての商品がISO/IEC規格に準じるよう義務付けるEU指令が発令され，安全に関する市場が急速に拡大している。日本では，国際規格に沿ってJIS（JIS C 0508；2000年発行，JIS C 0511；2008年発行）[1]が整備され，中国ではGB規格として整合・実施され，アジアでも市場拡大に拍車がかかっている。機械・機能安全に関する2008年度の世界市場は，欧米が約8,000億円，中国・アジアが約500億円，また機能安全に関する安全計装システムだけでも約1,500億円を超えている[2]。また，富士電機では機械・機能安全の日本市場は約1,800億円と推定しており，いずれの安全市場にも今後の急速な伸びが期待されている。その要因は，次に示す3点である。

(a)　オートメーションが高度化して安全を確保する方法を変えないと対応が難しくなっている（事故の規模が大きく，発生の予測が難しい）。

(b)　安全を確保する技術が発展してきている。

(c)　(a)(b)を受けて，安全のグローバル基準が整備されてきている。

ものづくりの現場では，従来，作業者に事故防止策を指導して安全を確保（労働安全）してきた。近年，装置自体が動作を停止し，人や設備の被害を最小限にする安全技術という新しい手法が構築された。この安全技術は，駆動システムの機構部に適用される“機械安全”と，駆動・制御システムの中枢をつかさどる制御部に適用される“機能安全”に分かれる。**図1**に，富士電機が提供する安全ソリューションの範囲を示す。

日本においては，各種プラント設備の多くが更新期を迎えようとしており，さらに高度な保全技術を持つ現場保全者層の退職が同時に進行し，重要な時期を迎えようとしている。古い設備を計画的に修繕する保全から，高度なセーフティインダストリ化への必要性が高まっている。すなわち，プラントの突然のシャットダウンを機会損失として定量的に推定し，それに見合う安全設備投資を実施したり，古い設備であることから発生する人的災害や製品不良を設

図1　富士電機の安全ソリューションの範囲

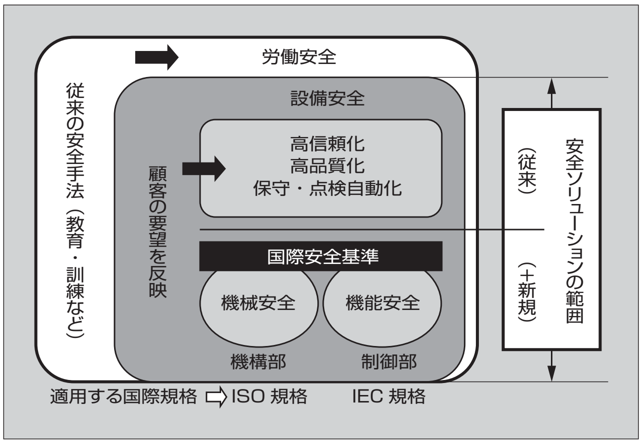


図 2　安全ソリューションの適用分野

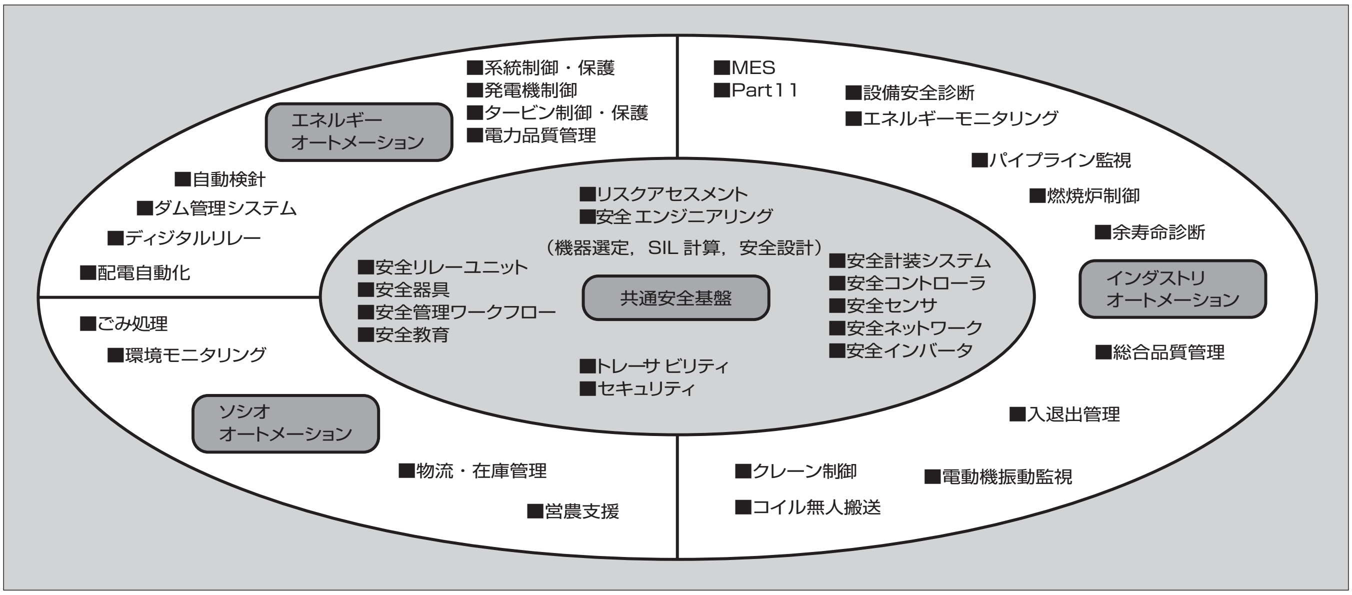
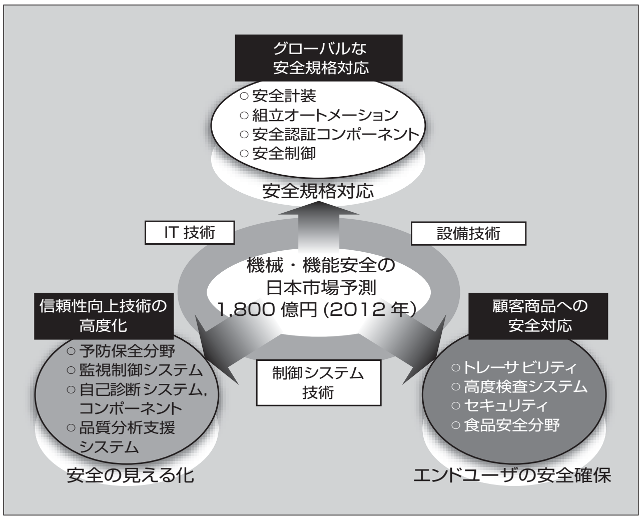


図 3　IT・制御・設備技術の融合で実現するセーフティインダストリのコンセプト



備全体に対する網羅的リスク分析から得られた対策で防止するなどの安全への取組みである。

一方，このような生産現場の安全は，労働安全衛生部門が統括している場合が多く，新しい安全基準の適用，推進が今後の課題となっている。

3　富士電機が推進するセーフティインダストリオートメーション

3.1　セーフティインダストリへの取組み

富士電機が取り組んでいる安全ソリューションの適用分野を**図 2** に示す。この中で，インダストリオートメーション分野では，プロセスや機械・装置のコンポーネントやオートメーションシステムの次世代化に取り組んでいる。その中の重要テーマである“セーフティインダストリ”のコンセプトを**図 3** に示す。安全計装・組立てオートメーションのグローバルな安全規格対応や予防保全・自己診断システムなどの信頼性向上技術の高度化，顧客商品への安全対応などを，IT 技術・制御システムプラットフォーム・設備技術と融合した形でセーフティインダストリオートメーションとして提供する。

機械安全・機能安全を総合的にコンサルティングして，“安全で安心なものづくり”を支援するなど，総合的な安全ソリューションサプライヤを目指している。

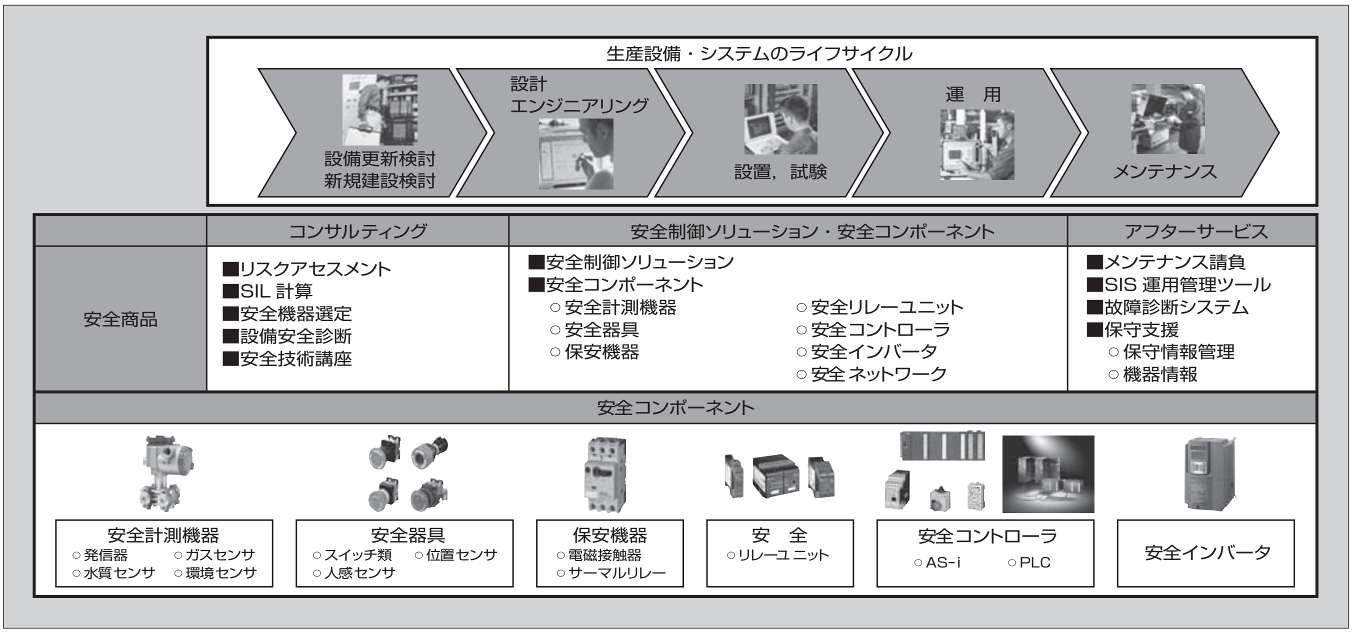
3.2　安全ソリューションの商品体系

富士電機が提供する安全ソリューションの商品体系を**図 4** に示す。セーフティインダストリオートメーションを実現する安全コンポーネントを各種ラインアップしている。具体的には，多岐にわたる安全規格に適合している安全器具（押しボタンスイッチ，ドアスイッチ，ライトカーテン），保安機器（電磁接触器，サーマルリレー），安全リレーユニット，安全コントローラ〔PLC（SIL[注]3），MICREX-NX Safety（SIL3）〕，安全圧力発信器〔FCX-AⅢ（SIL2）〕，安全インバータ，安全ネットワークなどである。

さらに，富士電機は，安全コンポーネントだけでなく，顧客の生産設備・システムのライフサイクルにおいて必要となる安全コンサルティング（リスクアセスメント，メンテナンス支援，運用支援，リプレース支援，安全技術講座開催）や安全エンジニアリング（安全機器選定，SIL 計算，安全システム設計），安全制御ソリューションなどを提供している。安全制御ソリューションとは，エネルギー分野などで培ってきた安全技術を基盤とし，その上に新しい考え方の国際安全基準を融合させた技術である。詳細は，本号の“現場の安全を守る安全制御ソリューション”を参照願いたい[3]。

〈注〉SIL：69 ページの「解説 1」参照

図 4　安全ソリューションの商品体系



4　安全コンサルティング

産業分野で“安全で安心なシステム”を構築するには，リスクアセスメント，機械安全，機能安全，セキュリティ，データの電子記録，設備の予防保全など広範囲な技術が必要である。富士電機は，これらの技術を総合的にエンジニアリングして安全コンサルティングや安全制御ソリューションとして提供することができる。次に，安全コンサルティングのサービスの一部を紹介する。

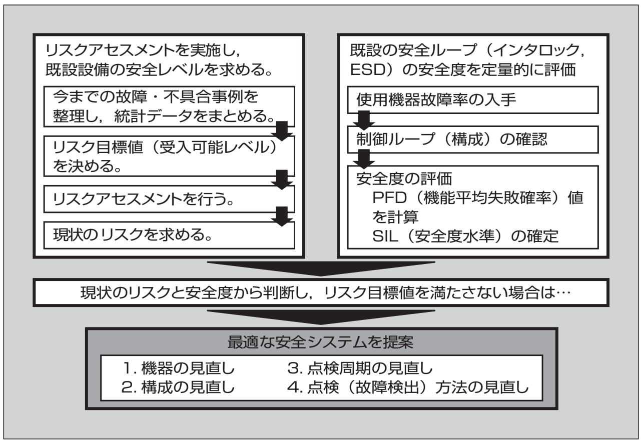
4.1　設備安全診断

富士電機は，既設設備のリプレース支援サービスの一つとして，“設備安全診断”を用意している。**図 5** にその概要を示す。プラント設備の更新や大規模な改修が難しい状況においては，既存設備の安全性を高める必要がある。その一つの手法として，保全側から見た既存設備の安全度診断が有効である。過去の故障や不具合実績を整理し，統計データとしてまとめ，それをベースにしてリスクアセスメントを実施し現状のリスクを求める。次に，使用機器などのシステム構成，故障率，プルーフテスト間隔などから安全度を定量的に求める。以上の二つの結果から判断したリスクが目標値を満たさない場合は，機器・構成・プルーフテスト間隔・点検方法（故障検出方法）の見直しなど，最適な安全システムを提案する。

4.2　リスクアセスメント

富士電機は，リスクアセスメントを安全コンサルティングのメニューとして用意している。国際規格 IEC 61508 では，安全機器・システムなどをライフサイクルで管理することを規定している。このライフサイクルの中で重要な位置付けにあるのが“潜在危険とリスク分析”の

図 5　設備安全診断の概要

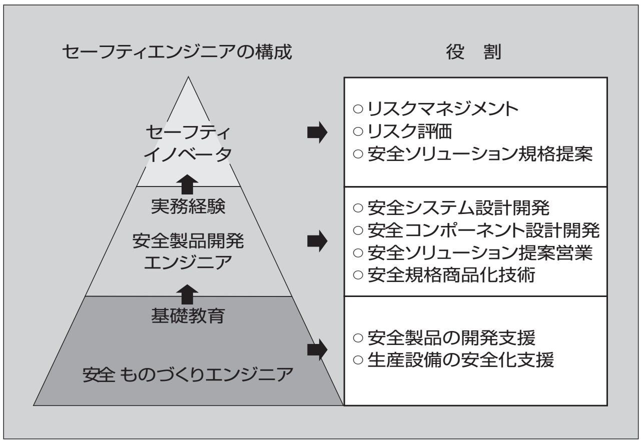


フェーズである。プラントと制御装置に生じる潜在危険と危険事象を明らかにするためには，HAZOP（Hazard and Operability Study）・リスクグラフなどのリスク分析の手法を使用し，潜在危険の除去方法の考慮，危険事象の発生しやすさの査定，危険事象に関して起こりうる被害を明確化し，プラントリスクの推定・査定（リスクアセスメント）を行う。

4.3　安全エンジニアリング

制御システムの安全（機能安全）にかかわる国際規格として IEC 61508 が制定されている。プロセス産業向け国際規格 IEC 61511 など産業分野ごとの規格やガイドラインの制定が進んでいる。機能安全は危険源を取り除くのではなく，安全機器・システムなどを追加することによって一定レベルの安全を確保する考え方である。コストなどの理由で本質安全が実現できない場合の合理的な手段である。富士電機は，こうした国際安全規格に基づいた安全エンジニアリングを提供している。例えば，安全計装システム

図 6　安全ソリューションを支えるセーフティエンジニア



SIS（Safety Instrumented System）の設計では，SIS への安全要求仕様 SIF（Safety Instrumented Function）を満たした上で，かつ，おのおのの SIS 機能ループが要求された安全度水準 SIL を満足させるエンジニアリング（安全機器選定，安全システム設計，SIL 計算）が提供できる。このSIL とは，電子安全機器・システムなどに割り当てられる安全機能に対する目標機能の失敗尺度であり，1 ～ 4 の 4 段階が定義されている。この定義は，安全機器・システムなどへの作動要求当たりの安全目標機能失敗平均確率がそれぞれ，10，100，1,000，10,000 年に 1 回という意味である。

4. 4　設備保全の支援ソリューション[4]

富士電機は，設備保全作業をサポートするメニューを用意している。機能安全規格には，保全管理に関する次の四つの内容が規定されている。

(a)　機能安全の維持を保証する目的で運用および保全の計画を作成する。
(b)　設計上の機能安全が維持されるように保全，修理する。
(c)　改修および改造が行われている間での機能安全が適切であることを保証する。
(d)　保全要員へ安全機能水準維持のための訓練を行う。

このように，安全度が定量的に評価されている安全機器・システムなどにおいて，想定した安全度を維持，確保するためには，正しい設置，正しい使用，そして正しい保全管理が必要である。そのためには，使用されている機器などの故障状況を常に把握し，これらのデータを保存，管理することが，安全度を維持・確保する上で重要である。

4. 5　セーフティエンジニアの育成

富士電機は，**3. 2** 節で紹介したさまざまな安全ソリューションを的確な内容かつタイムリーに提案できるセーフティエンジニアの育成に力を入れている。**図 6** にその構成と役割を示す。リスク分析，リスク評価などのセーフティコンサルティングができる“セーフティイノベータ”や安全システム設計ができる“安全製品開発エンジニア”，安全製品の開発支援や生産設備の安全化支援を行う“安全ものづくりエンジニア”など，“エンジニア全員がセーフティエンジニア”を目標としてその育成を進めている。

5　あとがき

富士電機のセーフティインダストリオートメーションの全体像および安全ソリューション，安全コンポーネントの商品体系と製品技術を紹介した。これからの安全は，機械安全と機能安全の両方を取り入れて，総合的にプラントや設備の安全を維持する必要がある。富士電機は，今後も，お客さまの“安全で安心なものづくり”の実現を支援するためのソリューションを提供していく所存である。

参考文献

(1)　機能安全とJIS C 0508. 日本電気計測器工業会. 2003-11.
(2)　ARC, Process Safety System Worldwide Outlook-Market Analysis and Forecast Through 2012, 2008.
(3)　小塙明比古ほか. 現場の安全を守る安全制御ソリューション. 富士時報. 2009, vol.82, no.5, p.28-34.
(4)　長谷川正美.「計画保全士養成コース」テキスト. 日本プラントメンテナンス協会. 2009-03.

斉藤　純一郎
水力発電，電力系統，太陽光発電等のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部産業システム統括部統括部長。電気学会会員。

垣堺　健
計測機器，分散型制御システムおよび安全計装システムの開発・設計業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部産業システム統括部副統括部長。計測自動制御学会会員。

小林　益之
安全計装システム，分散型制御システムの商品企画，拡販に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部産業システム統括部統合システム第一部主席。計測自動制御学会会員。

快適な社会を実現するグリーンソシオオートメーション

Green Socio-Automation to Realize a Comfortable Society

川尻　幸一 Kouichi Kawajiri　　平山　博之 Hiroyuki Hirayama　　笛木　豊 Yutaka Fueki

富士電機はグリーンソシオを“環境に調和した快適な生活を送る社会”と定義し，その実現に向け，センサ，ワイヤレスネットワーク，広域分散システムなどをコア技術として，環境・省エネルギーと安全・安心にかかわるソリューションを提供している。環境・省エネルギーでは，エネルギーの使用量やムダの見える化，省エネルギー活動を支援する「グリーンユース」などのソリューションを提供している。安全・安心では，農産物の育成履歴管理や食品の製造履歴管理などの食の安全の提案や緊急医療のための所在管理システムなどのソリューションを提供し，グリーンソシオの実現を目指している。

Aiming to realize a “green society”, which can be defined as “a society that leads a comfortable lifestyle in harmony with the environment”, Fuji Electric uses sensors, wireless networks, wide area distributed systems and the like as core technology to provide environmental and energy-savings solutions as well as safety and security solutions. For the environment and energy-savings, Fuji Electric’s solutions enable the amounts of energy usage and waste to be visualized, and provide energy-saving solutions such as merchandise of “GreenUSE”. For safety and security, Fuji Electric’s solutions provide food safety proposals such as cultivation history management for agricultural products, production history management for food products, location management for emergency medical treatment, and so on, aiming to realize a green society.

1　まえがき

政府は，新エネルギー導入や地球温暖化防止を狙いとした“環境・省エネルギー”と，国民が安全に安心して暮らせる“安全・安心”を軸に新産業の創出を視野に入れた景気対策を積極的に進めている。ブロードバンドや携帯電話，無線通信，地上デジタル放送が整備され，すべての産業がこの通信基盤[(1)]を活用できるようになってきた。この通信基盤の上で“環境・省エネルギー”や“安全・安心”を軸とした社会的な課題を解決する新規ビジネスモデルの検討が進みつつある。環境面では，1997 年 12 月に締結された「京都議定書」を踏まえ，“地球環境”を意識した地球温暖化防止が大きくクローズアップされてきている[(2)]。わが国の温室効果ガス（2007 年 13.7 億トン）の約 9 割がエネルギー起源の CO_2 であることから，エネルギー発生を抑制するための法律が整備され，改正された「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（改正省エネ法）[(3)]が 2010 年 4 月より施行される。政府の方針として，“2020 年”の CO_2 削減目標を 2005 年ベースで 15% 削減するとしたことも省エネルギー（省エネ）対策，新エネルギー導入に大きな影響を与えると予想される。

富士電機は，“環境に調和した快適な生活を送る社会”をグリーンソシオと定義して，快適で豊かな社会づくりに貢献することを目指している。

2　富士電機の取組み

富士電機は今までも，環境対応の自動販売機や省エネ対応のオープンショーケースのように日常生活を快適にするための製品や，ETC 用車両センサのように高速道路の入口で自動車の流れを安全にかつ円滑にして渋滞を少なくするのに役立つ製品を提供してきた。このような環境に調和し，快適でかつ生活に密着したソリューションとしてグリーンソシオオートメーションに取り組んでいる。

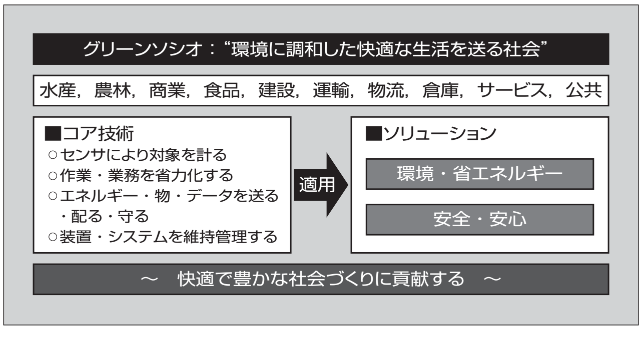
2.1　グリーンソシオのコンセプト

第 3 期科学技術基本計画[(4)]に挙げられている社会・環境分野の 2020 年頃のあるべき姿は，富士電機が目指すグリーンソシオの方向と一致している。

(a)　地球温暖化・エネルギー問題の克服への道筋整備
(b)　環境と調和する循環型社会の実現
(c)　世界を魅了するユビキタスネットワーク社会の実現
(d)　国土と社会の安全確保
(e)　暮らしの安全確保

図 1 に示すグリーンソシオのコンセプトを実現するソリューションを市場へ提供するためには，センシング，トレーサビリティ，セキュリティ，最適化技術など以前から培ってきた技術やノウハウをうまく融合させる必要がある。つまり“センサにより対象を計る”“作業・業務を省力化する”“エネルギー・物・データを送る・配る・守る”“装置・システムを維持管理する”などの技術をシームレスに

図 1　グリーンソシオのコンセプト



結合させたソリューションを提供し，社会が要求する環境・省エネ，安全・安心の課題を解決していくことである。対象分野は，水産，農林，商業，食品，建設，運輸，物流，倉庫，サービス，公共などの社会全般である。

2. 2　グリーンソシオの商品イメージ

人に優しく快適で安全な生活環境の実現に向けて，富士電機は多くのソリューションを提案してきた。快適で安全な生活環境の実現には，センサネットワークやユビキタスコンピューティングでインテリジェント化されたシステムによって環境や人・物の変化をつかまえ，全体最適な制御により常時良好な状態にする仕組みを構築しなければならない。そのためのイノベーションの創出に向けた技術開発に注力している。具体的には，主に次に示す 3 点を特徴とした関連技術およびソリューションである。

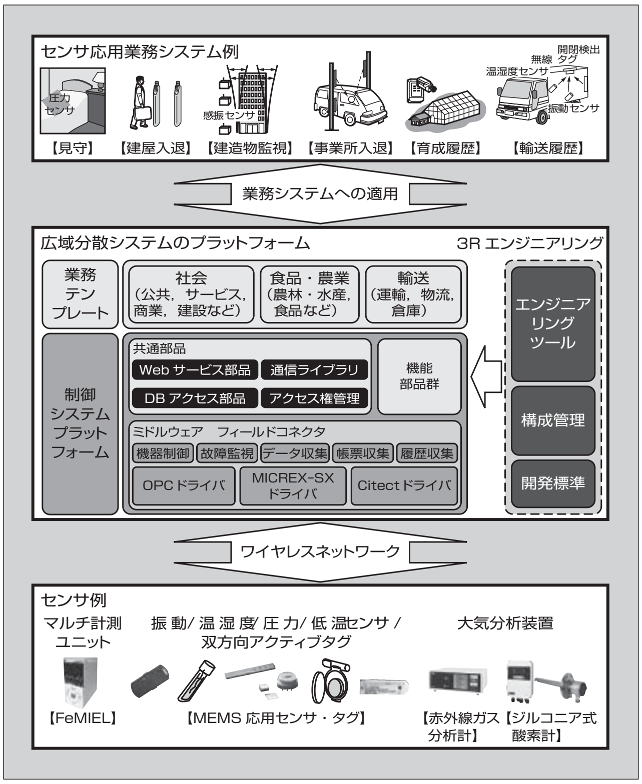
(a)　計測機器，放射線センサ，ガス分析センサなどに MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサ技術[5]を適用することによる小型化，省電力化

(b)　センサへのワイヤレスネットワーク機能の付与[6]によるフィールドのインテリジェント化，およびシステムとのシームレス結合によるフィールドの見える化

(c)　“センサ”による計測，“ワイヤレスネットワーク”による収集，および“広域分散システムプラットフォーム”の適用による効率的な業務システムの構築

図 2 にこれら関連技術を活用したグリーンソシオソリューションの商品イメージを示す。

図 2　グリーンソシオソリューションの商品イメージ



2. 3　グリーンソシオを支える技術

グリーンソシオを支える技術として重点的に取り組んでいるセンサ技術，ワイヤレスネットワーク技術，広域分散システムプラットフォームの概要を紹介する。

(1)　センサ技術

代表的なセンサは発信器用圧力センサ，ガス警報機用の薄膜ガスセンサ，振動センサ，環境化学物質用の分析チップ，個人被ばく線量計用 RI センサ，クリーンルーム内の気流や赤外線式ガス分析計用のフローセンサなどである。これらセンサ素子は MEMS 技術により小型軽量かつ低消費電力化がなされている。センサ素子と組み合わせる回路も高密度実装技術を適用することでセンサ全体を小型軽量化している。センサにコイン電池駆動のワイヤレスネットワーク機能を持たせることで，省配線化，ラインでの頻繁な機器組替えへの対応，移動体を対象とした状態監視などを実現した。

(2)　ワイヤレスネットワーク技術

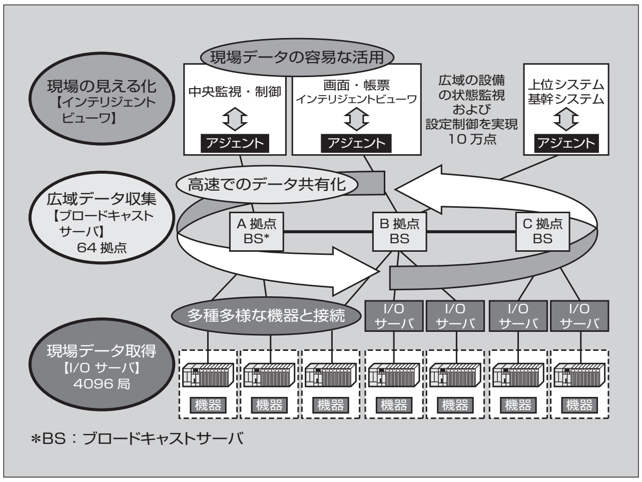
富士電機は早くから RFID タグを製品化し，物流管理などに応用してきた。電力・ガス・水道の自動検針やエネルギー連続計測のための無線技術として低消費電力メッシュネットワーク技術を実用化した。さらにモータの振動診断のための低消費電力型加速度センサの無線技術や，トラックなどのタイヤ空気圧を常時監視計測するタイヤ圧力センサ（TPMS）の金属構造物環境での無線技術などを実現した。

(3)　広域分散システムプラットフォーム

広域に分散するセンサで計ったフィールドデータを収集するミドルウェア「フィールドコネクタ」の開発を完了し，広域に分散するセンサの計測値をリアルタイムに収集・制御する仕組みを完成した。フィールドコネクタは，現場の見える化を容易に行うために，**図 3** に示すように，次の四つの部品で構成されている。

(a)　センサやコンポーネント機器からフィールドデータを収集する I/O サーバ

図 3　フィールドコネクタを用いた広域分散システムの構成



(b)　分散した拠点間のフィールドデータを共有化するブロードキャストサーバ
(c)　業務システムからフィールドデータをアクセスするためのアジェント
(d)　画面表示設定用のインテリジェントビューワ

フィールドコネクタを使うことで，システム全体で10万点，64拠点，4,096局規模のリアルタイムな監視制御ができる。

フィールドデータを加工，編集，表示，設定，制御する業務システムは，**図2**の広域分散システムプラットフォームを使って共通の手順で開発できる。このプラットフォームは，フィールドコネクタ，Webサービス，通信ライブラリなどの共通部品，画面，制御，集計，監視などに分類した機能部品群，ソースプログラムの自動生成や試験の自動化ツールを含むエンジニアリングツールと過去に経験した業務ごとの業務テンプレートから構成されている。画面プログラムの作成では，画面の要求仕様を画面定義ルールに従ってXML（Extensible Markup Language）で定義する。この定義と画面要素ごとのプログラム部品を自動生成エンジンが抽出し組み合わせて，要求仕様の画面プログラムを自動生成する。このようにして，顧客の要求事項に対し，再利用を促進し，新規プログラムの作成を抑え高品質な業務システムを提供することができる。

“環境・省エネルギー”と“安全・安心”を実現するグリーンソシオを，社会分野・食品農業分野・輸送分野に提供している。そのソリューション商品の例を**表1**に示す。

3　グリーンソシオソリューションの事例

グリーンソシオを実現するため“環境・省エネルギー”と“安全・安心”に向けたソリューションを以下に紹介する。

表1　グリーンソシオのソリューション商品の例

グリーンソシオ（環境調和・快適・生活）	社　会（公共，サービス，商業，建設など）	食品農業（農林，水産，食品など）	輸　送（運輸，物流，倉庫）
環境・省エネルギー	環境モニタリング エネルギー計測 新エネルギー 省エネルギー診断と対策 店舗エネルギー管理 グリーンユース グリーンキャビネット 環境報告	省エネルギー 診断と対策 新エネルギー 排水浄化処理 地産地消	モーダルシフト 共同配送
安全・安心	建造物遠隔監視 ガス機器遠隔監視 電動機振動診断 タイヤ空圧診断 ETC関連 児童・高齢者見守 所在管理，異物混入検査 建屋・事業所入退 重要物持出管理 通関検査，施設監視 安全報告	防除指導 生産履歴・公開 トレーサビリティ 育成モニタリング	トレーサビリティ 輸送状態計測 コンテナ物流

3.1　環境・省エネルギー向けソリューション

環境・省エネルギー向けソリューションの全体像を**図4**に示す。このソリューションは，エネルギー計測によるエネルギー使用量の見える化，省エネ診断とその対策，省エネモデルによるエネルギーのムダの見える化，そしてエネルギー報告書の作成と省エネ活動を支援するグリーンユース機能で構成される。

(1)　エネルギー使用量の見える化

図5に示すコンパクトマルチ計測ユニット「FeMIEL」を使うことで，エネルギー使用量の見える化が実現できる。FeMIELの特長を次に示す。

(a)　電力1回路に加えて各種のエネルギー計測が可能
(b)　計測した電力量はCO_2排出量や料金への換算が可能
(c)　5分周期記録で1年間分のデータを本体に保存可能
(d)　ネットワーク機能（Ethernet，RS-485選択）搭載

(2)　エネルギーのムダの見える化

既にエネルギー使用量の見える化やインバータ駆動による省エネ対策を進めてきた顧客に対して，簡便な省エネ対

図4　環境・省エネルギー向けソリューションの全体像

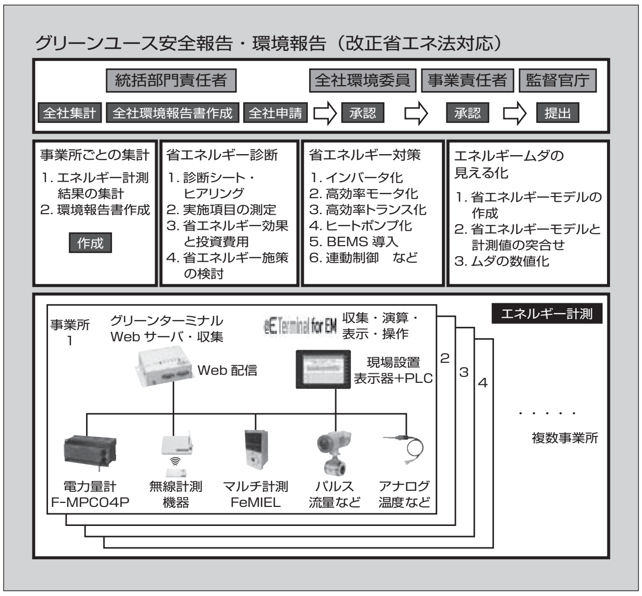
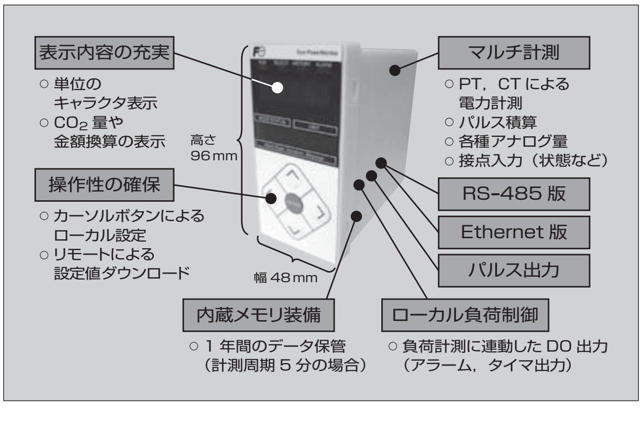


図5　コンパクトマルチ計測ユニット「FeMIEL」



策として“ムダの見える化”という省エネ診断コンサルティングを提供している。設備の理想的な運転状態のエネルギー使用量（省エネモデル）と計測したエネルギー使用量とを比較することで，その差分をムダとして提示する。その手順を**図6**に示す。例えば部品工場では，ムダの見える化を参考にして設備の運用状態を適正化することで5～10％の省エネ効果が得られた。この手法は，産業分野だけでなくテナントビルなど民生分野でも活用でき，生産設備や施設の省エネ対策に有効である。

⑶　省エネ活動と報告書作成を支援するグリーンユース

2010年から施行される改正省エネ法では，エネルギー使用量が原油換算で1,500 kl を超える事業者はエネルギー管理が義務付けられるようになる。このような事業者の省エネ活動と報告業務を支援する「グリーンユース：GreenUSE」を提供している。グリーンユースは，部門の集計や部門間の申請・承認にワークフロー機能を活用し，企業の環境と安全の見える化を実現する。具体的には，店舗ごとのエネルギー使用量や安全点検の結果を店長から地区の管理者へ報告，さらに事業者全体として環境報告書や安全報告書としてまとめ，監督官庁への提出と保管を行う。グリーンユースにより，エネルギー計測と事業所内での集計，全社の集計と承認および監督官庁への報告をシームレスに統合し，報告業務の合理化と環境経営の実践を支援する。

3.2　安全・安心向けソリューション

安全・安心向けソリューションとして，農林・水産・食品・物流・商業の分野に提供している食の安全ソリューションと，公共・サービス分野に向けて提供している緊急医療のための所在管理ソリューションについて次に紹介する。

⑴　食の安全ソリューション

食の安全ソリューションは，**図7**に示すように，農産物の育成履歴から食品の製造，輸送品質までの履歴情報を一元管理することで，消費者への安全な農作物と加工食品の提供を支援している。

(a)　農産物の育成履歴管理

農作物育成過程の生産情報を生産現場へモバイル端末で指示，収集するシステムを開発した。これは，防除指導と育成状況の実績収集からなる。育成に必要な農薬のデータベースを生産者のモバイル端末に配信し，育成物や病害虫防除に適する農薬種類，農薬濃度，散布時期などを生産者にガイダンスする。育成者名や農薬散布実績，施肥実績をモバイル端末から収集する。これにより失効農薬の使用や農薬使用基準違反を防止し，安全な生産プロセスの実現を支援する。

(b)　食品の製造履歴管理

図6　省エネルギーモデルと計測値とによるムダの見える化

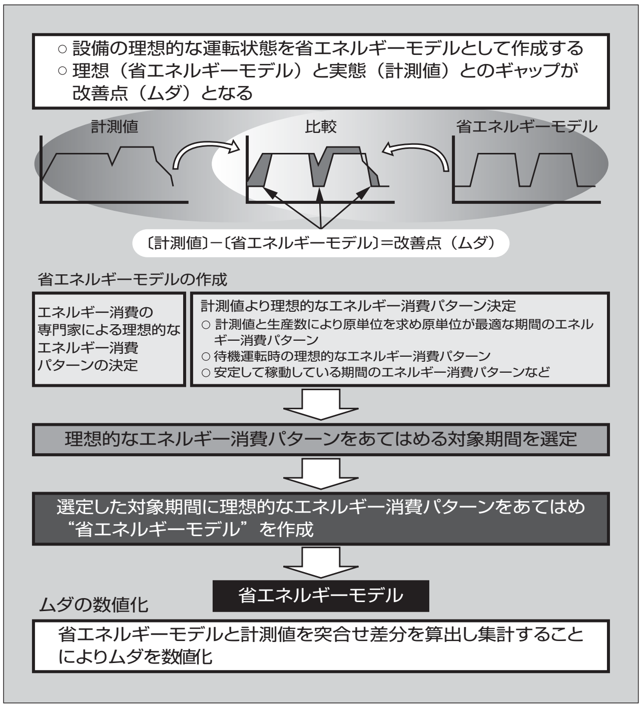


図7　食の安全ソリューション

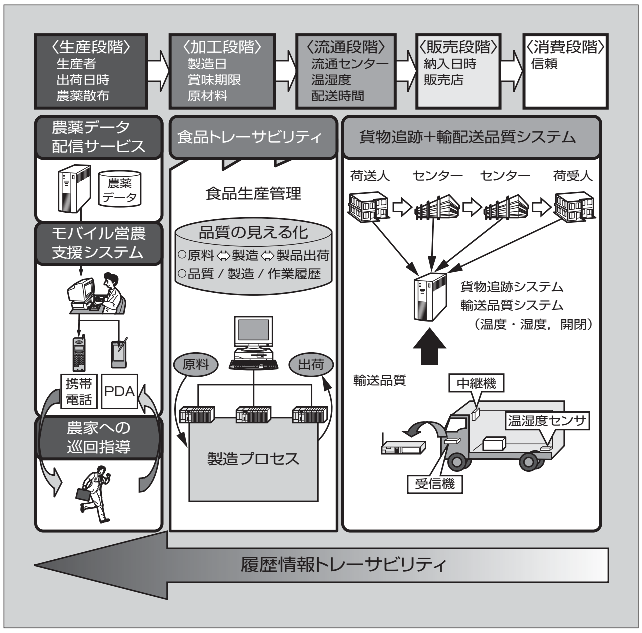
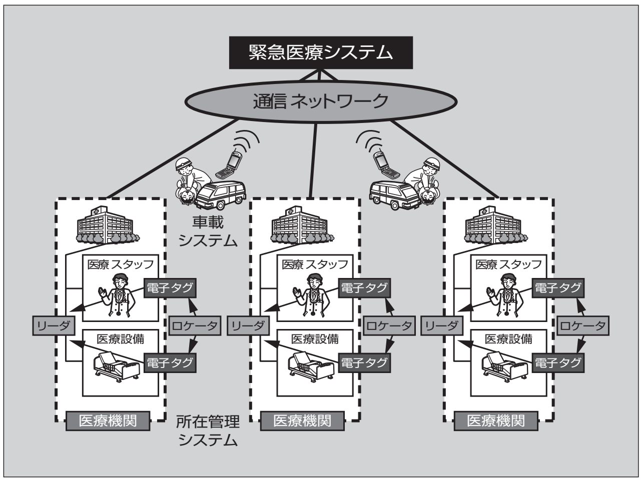


図8　緊急医療のための所在管理ソリューション



食品生産管理システムを導入し，資材購買，生産計画，製造実績，物流の各サブシステムを資材購入番号，製造番号，出荷番号などで関係付けることで，食品製造工程の履歴管理を実現した。製品に刻印された製造番号から製造した工場ラインや物流倉庫の製造履歴，さらに，その製造番号の製品がいつ，どこに出荷されたかの流通履歴，資材購入番号から購入資材を使用した製品の出荷先の原材料履歴を瞬時に参照できる。異物混入などの不良発生時，この履歴管理の仕組みを利用して，消費者からの回収や迅速な販売停止指示ができる。

(2)　緊急医療のための所在管理ソリューション

緊急医療のための所在管理ソリューションを**図 8** に示す。広域に分散した医療機関において，医療スタッフや医療機器に電子タグを装着し，医療機関内のロケータ（部屋番号などのロケーション番号を電子タグに送信する装置）と組み合わせることで，医療スタッフの所在や医療機器の稼動状況を明示的なロケーションとして正確にかつリアルタイムに把握する。稼動状況を緊急車両へ通知することにより緊急時の適切な医療搬送の判断を支援する。電子タグは，NTT 未来ねっと研究所の仕様を基に開発したもので，非接触で読み書きできる双方向アクティブタグである。次に示す三つの特長がある。

(a)　鉄道改札で使用している IC カードと同じ HF 帯の電波に 32 バイト相当の情報を乗せ，10 m 離れたところからタグへの書込みができる。

(b)　UHF 帯の電波を使い書き込んだ情報とタグの持っている識別コードを 100 m 離れたところから読み取れる。

(c)　用途に応じてセンサ計測値を取り込むこともできる。

4　あとがき

“環境・省エネルギー”“安全・安心”の課題は，製造業や特定の事業者に限らず，われわれの生活に密着したところに多数存在する。富士電機はこれらの課題を解決するソリューションを多数提供してきている。今後は，グリーンソシオソリューションを発展させ，環境に調和した快適な生活を送る社会づくりに貢献していく所存である。

参考文献

(1)　ICTビジョン懇談会報告書～スマート・ユビキタスネット社会実現戦略～. 総務省ICT　ビジョン懇談会. 2009-06.

(2)　打川和男, 内藤高志. 温暖化対策の基本と仕組みがよくわかる本. 秀和システム. 2008-09.

(3)　改正省エネルギー法の概要について～工場・事業場部門～. 経済産業省　関東経済産業局エネルギー対策課. 2009-02.

(4)　第3期科学技術基本計画. 官報. 2006-03.

(5)　友高正嗣, 山下悟. 環境と安全・安心に寄与するMEMSと今後の取組み. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.358-361.

(6)　町田潤一ほか. 各種センサと無線技術の融合によるユビキタス環境の実現. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.375-378.

川尻　幸一

社会・環境分野の情報制御システムの企画・エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部社会・環境システム統括部長。電気学会会員。

平山　博之

社会・環境分野の情報制御システムの企画・エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部社会・環境システム統括部ソリューション技術部長。情報処理学会会員。

笛木　　豊

社会・環境分野の情報制御システムの企画・エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部社会・環境システム統括部ソリューション技術部マネージャー。電気学会会員。

特集

制御システムプラットフォームによる生産性と品質の向上

Control System Platforms for Improved Productivity and Quality

廣瀬　文彦 Fumihiko Hirose　　笹谷　俊幸 Toshiyuki Sasaya　　森　伸一郎 Shinichiro Mori

富士電機は，制御システムの生産性と品質の向上のために，実行系と支援系で構成される制御システムプラットフォーム（PF）の構築に取り組んでいる。実行系ではシステム規模に応じて大規模システム，中小規模制御システムと広域監視システムの三つのPFを提供している。支援系では，削減（Reduce）・再利用（Reuse）・再資源化（Recycle）を徹底して推進する3RエンジニアリングPFを提供している。これらの制御システムPFの提供を通じて，エネルギー・産業・社会のあらゆる分野で生産性と品質を向上させたいというお客さまの要求に応えている。

In order to improve the productivity and quality of control systems, Fuji Electric is constructing control system platforms (PFs) consisting of an execution system and a support system. For the execution system, three types of PFs (for large systems, medium and small systems, and wide area monitoring systems) are provided to match the size of the system. For the support system, a 3R engineering PF that promotes comprehensive reduction, reuse and recycling is provided. By providing these control system PFs, Fuji Electric is responding to customer requests for improved productivity and quality in all energy, industrial and social application fields.

1　まえがき

企業は経営競争力向上のために，将来的に成長が見込める分野に，投資を集中させてきている。新規ビジネス分野では製品を早期に市場投入し，市場シェアを確保できるかが経営を左右する。制御システムのメーカーとしてはユーザの生産現場で新製品を作るための制御システムへの要求を短納期かつ高品質で実現し提供することが最重要となってきている。

これまでの情報技術と制御技術の進化は，工場の生産設備の自動化を拡大してきている。さらには，制御システムと設備機器をつなぐネットワークの機能や処理速度が向上して，SCM（Supply Chain Management）やMES（Manufacturing Execution System）などの生産管理システムとシームレスに接続していくことで，高い生産性と高品質を実現できる垂直統合型の制御システムが構築できるようになってきた。

富士電機は，プロセス制御からディスクリート制御まで多岐にわたる制御分野で多くの実績を挙げてきている。各制御分野で標準化や効率化を推進するための技術進化を遂げてきた。[(1)(2)]

市場ニーズはさらに多様化や高度化の要求が増している。国際標準化への対応も含め，開発ソフトウェアボリュームが増大してきており，開発の効率化と高品質化は大きな課題である。

図1に示すように，課題を解決するためには次の要件を満足する必要がある。

(a)　エンジニアリングノウハウが共有できる。

(b)　フィールドからコンピュータまでの垂直統合支援ができる。

(c)　ソフトウェア資産を有効活用できる。

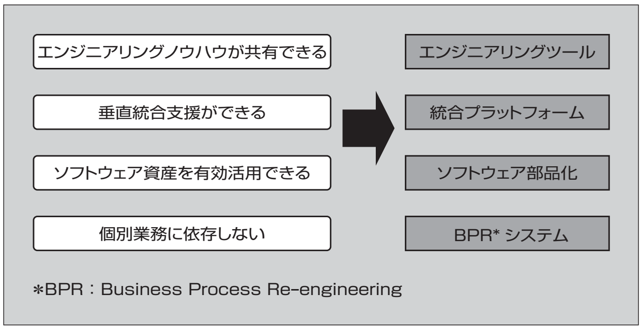
(d)　個別業務に依存しない。

このためには，業種や分野や機種によらずに統合的に開発する必要がある。結果的に開発期間の長期化や属人的な開発による技術の停滞や効率低下の問題を改善することができる。完成している品質の高い部品を使い，かつ分野・業種・機種に依存せずに流通を促進する仕組みが重要である。それを実現する手段が，技術基盤を統一するための実行系のプラットフォーム（PF：Platform）と支援系のPFである。

業務フローを支援するBPR（Business Process Re-engineering）システムは，世代を超えたエンジニアたちが利用できる。フィールドからコンピュータまでの垂直統合システムへもシームレスに対応できて，ビジネスパートナーにも容易に使える。近い将来懸念されるエンジニアの不足を解決し，開発の効率化と高信頼性を実現していける。

富士電機では制御システムの統一を目指して実行系のPFと支援系のPFで構成される制御システムPFの強化に取り組んでいる。

図1　生産性と品質向上のための要件と機能構成



2　制御システムプラットフォームの取組み

制御システム PF は**図 2** に示す実行系 PF と支援系 PF で構成される。

実行系 PF は，使用目的に応じて大規模制御，中小規模制御と広域監視の PF を提供している。大規模制御 PF には，中大規模のプロセス制御向けのシステム PF である情報制御システム「MICREX-NX」[(1)] などがある。中小規模制御 PF は，HMI（Human Machine Interface）にパソコンを，そしてコントローラに PLC（Programable Logic Controller）を採用した中小規模向けの制御システムである。広域分散システムは，主に，電鉄，道路，空港，電力などの広域に分散設置されたシステムを遠隔で監視するためのシステムである。

支援系 PF は，前述の実行系 PF を共通にエンジニリングするものであり，削減（Reduce）・再利用（Reuse）・再資源化（Recycle）を推進する 3R エンジニアリング PF である。今後の実行系を構成するハードウェアの進化に伴って，制御システムで実行している機能を電子機器などの組込み系へ実装していくことが拡大し，ソフトウェア資産の流用が進んでいくことも視野に入れて，ソフトウェア開発の究極の効率化を目指している。

3　制御システムプラットフォームの実行系

3.1　大規模制御システムプラットフォーム

大規模制御システム PF は，垂直水平統合を実現する中大規模のプロセス制御分野からディスクリート制御分野までを高度でかつ高速に制御できる制御システム PF である。なお，MICREX-NX は，この PF をベースに提供しているシステムである。

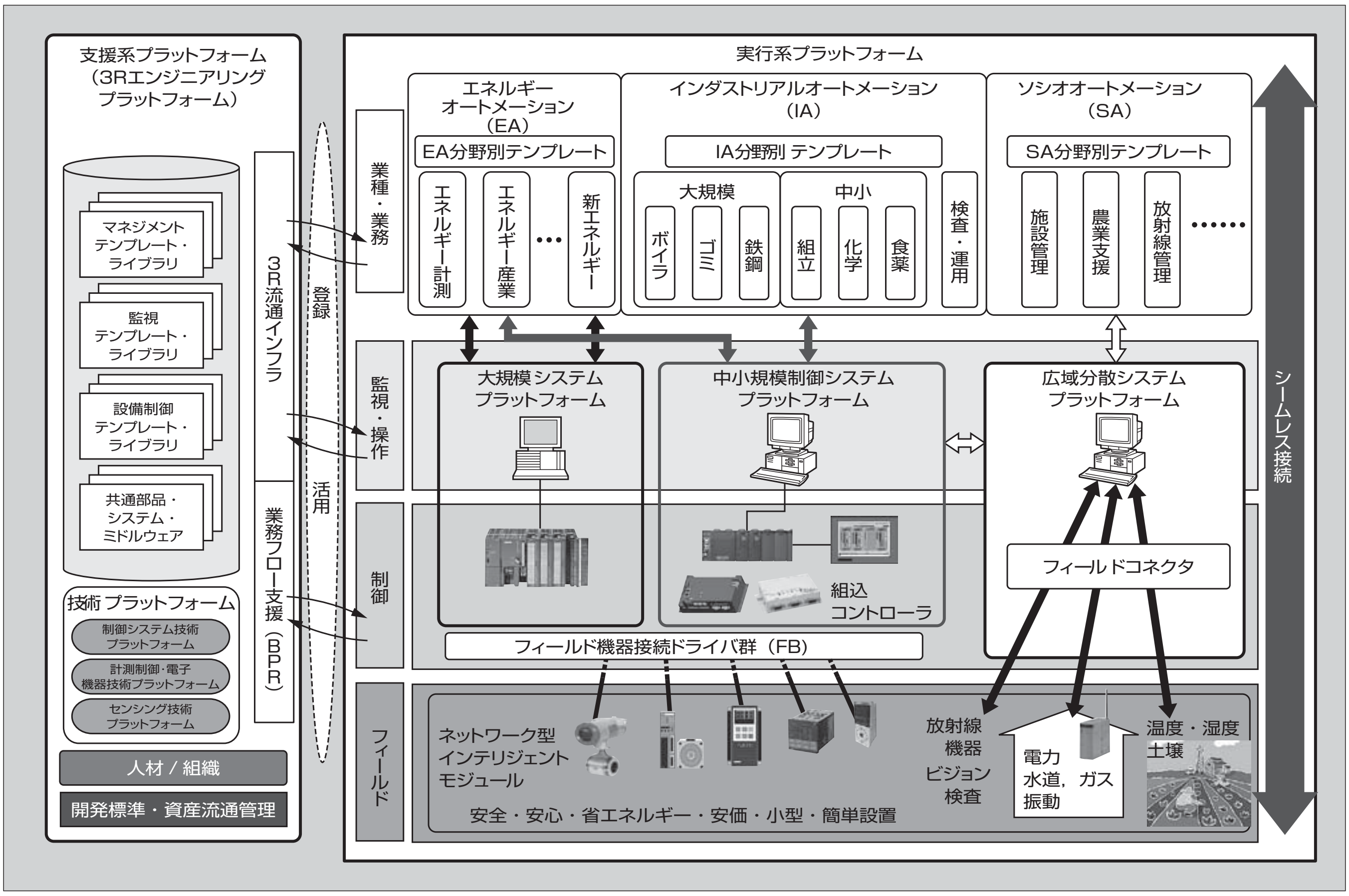
3.2　中小規模制御システムプラットフォーム

従来，中小規模制御システムは Windows〈注 1〉をベースとしたパソコンと PLC で構成されている。監視系のミドルウェアに SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition System）ソフトウェアが採用されている。パソコンと PLC の高機能化と SCADA ソフトウェアにより，顧客のニーズに対応したシステムを容易に構築できたので，大きな開発投資を必要とせずに市場投入できた。しかし，分野ごとに独自の制御システムを提供することとなり，異なる SCADA ソフトウェアを使用している制御システム間で相互に画面を流用することができずに，各分野が持つソフトウェア資産を流通させられなかった。

今回開発した**図 3** の中小規模制御システム PF は，この

〈注 1〉Windows：米国 Microsoft Corp. の商標または登録商標

図 2　制御システムプラットフォームの構成



ような既存の資産を活用したいという顧客ニーズに対応できるように，各社の SCADA ソフトウェアをアドオンできる仕組みを搭載し，既存システムのマイグレーションが容易にできるようにした。

この PF は，各種 API（Application Program Interface）を搭載し，容易に分野ごとに準備された機能が結合できる仕組みなので，重複開発の削減と開発効率の改善を実現できる構造となっている。制御システム PF の特徴は以下のとおりである。

(1)　軽快な Web システムの実現

リッチクライアント型の採用で，Web ブラウザを介さない軽快な Web 対応システムが実現できる。

(2)　高価なミドルウェアが搭載不要

ダウンロード配信型クライアントの採用により，高価なミドルウェアを搭載することなく，監視制御システムが実現できる。

(3)　過去の SCADA ソフトウェア資源にフレキシブルに対応

iFIX〈注 2〉，CitectSCADA〈注 3〉，InTouch〈注 4〉などの SCADA ソフトウェアも搭載することができる構造とすることで，マイグレーションが容易である。

(4)　アドイン機能による開発効率の向上

分野別機能が充実し，アドイン機能を使って容易に分野ごとの機能を拡張することができ，下位コントローラ用の I/O ドライバも容易に実装できる。

3. 3　広域分散システムプラットフォーム

電鉄，道路，空港，電力などの広域で分散設置された拠点の監視を必要とする監視システムの実行系として広域分散システム PF がある。この PF の特徴は，大容量データかつ高速データリフレッシュを実現できる。この要件は次のとおりである。

(a)　適用 OS（Operating System）：UNIX〈注 5〉，Linux〈注 6〉，Windows

(b)　開発言語対応：C 言語，VB〈注 7〉，.net〈注 8〉，Java〈注 9〉

(c)　広域分散に対応：64 拠点，64局/拠点

(d)　大規模対応：100,000 タグ

4　制御システムプラットフォームの支援系（3R エンジニアリング）

制御システムを構築する上で企画，設計，製作，試験を行うエンジニアリングには，高効率化と高品質化が要求されている。富士電機では従来エンジニアリングの全フェーズ（企画，設計，製作，試験，運用）を一貫して支援するシステムにより連続性を保ちつつ，記述型のエンジニアリング方法の水準向上を図り，制御システムの生産性と品質の向上に努力してきた。

今までは扱う機種に依存したソフトウェア設計スキルを必要としたので，世代を超えて誰もが容易にシステムを構築できるわけではなかった。

富士電機では，将来のソフトウェアエンジニアの不足に備え，制御系（DCS 制御設計，PLC 制御設計）エンジニアリングと情報系（C 言語などのソフトウェア開発）エンジニアリングとを融合して，相互に同一環境でエンジニアリングでき，さらにビジネスパートナーも活用できる 3R エンジニアリングの構築に取り組んでいる。

この 3R エンジニアリングは従来のブロックエンジニアリングや記述式エンジニリングとは異なり，モデルとして表現される構造的仕様のガイドラインを提供するソフト

〈注 2〉iFIX：GE ファナック・インテリジェント・プラットフォームス株式会社の商標または登録商標

〈注 3〉CitectSCADA：AEG Schneider Automation International 社の商標または登録商標

〈注 4〉InTouch：英国 Invensys Systems, Inc. の商標または登録商標

〈注 5〉UNIX：The Open Group の商標または登録商標

〈注 6〉Linux：Linus Torvalds 氏の商標または登録商標

〈注 7〉VB：米国 Microsoft Corp. の商標または登録商標

〈注 8〉.net：米国 Microsoft Corp. の商標または登録商標

〈注 9〉Java：米国 Sun Microsystems, Inc. の商標または登録商標

図 3　中小規模制御システムＰＦの実行系の構成

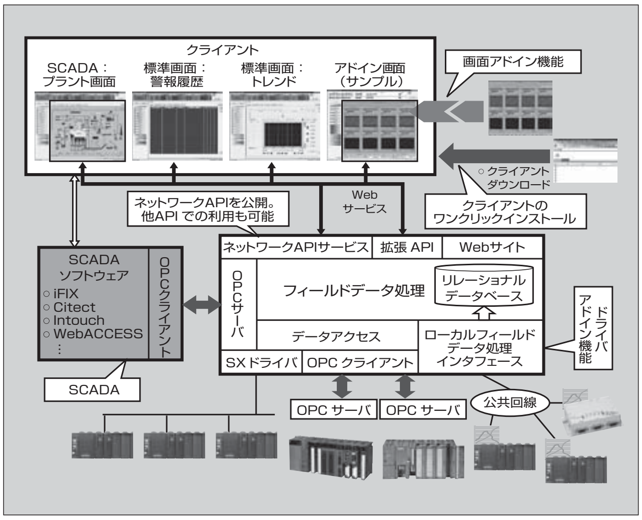
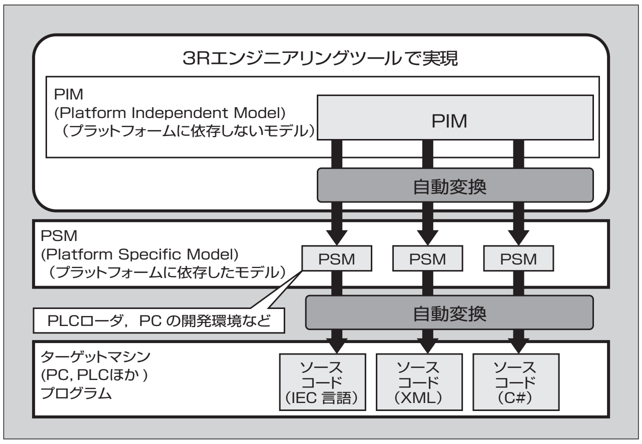


図 4　モデル駆動型アーキテクチャの考え方



ウェア開発手法である。**図4**のようなモデル駆動型アーキテクチャ（MDA〈注10〉：Model-Driven Architecture[3]）を採用することでシームレス環境に対応できるPFとした。これは，次の開発方式に基づいている。

(a)　システム要件定義には理解しやすい表現形式でPF独立モデル（PIM：Platform Independent Model）を用いる。

(b)　PIMは別の汎用プログラミング言語（例えばIEC言語，XML，C#など）に対応したPF特化モデル（PSM：Platform Specific Model）へと変換する。

(c)　PIMとPSMとの変換は通常，モデル変換ツールなどの自動化されたツールを使って行い，このツールが3Rエンジニアリングツールとなる。

4.1　3Rエンジニアリングの機能

従来のエンジニアリングにおいては，UNIX系，監視系，コントローラ系およびセンサ系は，おのおの個別のツールでエンジニアリングし保守している。3Rエンジニアリング PFは**図5**のように共通のツールの上で共通のGUIからシステムが構築できる先進的なシステムである。

図5のようにエンジニアは分りやすく表示されるPIMのソフトウェア部品を自由に配置し，接続することで，実装される機種を意識することなく，PF側で自動的に対象機種へローディングし，部品同士を結合するものである。

図6は3RエンジニアリングのGUIのイメージである。3Rエンジニアリングツール上でライブラリに登録されたテンプレートや部品をドラッグアンドドロップし，部品間を結線し，実行するPCやコントローラへダウンロードすることで目的の機能が実現できる。さらに，部品やテンプレートの内容を修正したい場合は，対象の部品をクリックするだけで部品が生成された対象のプログラミングツールが起動し，ソフトウェアの修正が可能となる。これにより，要件定義ができるエンジニアであれば容易に高度な機能が，簡単に，高品質で実現することができる。

〈注10〉MDA：Object Management Group（OMG）の商標または登録商標

図5　3Rエンジニアリングの考え方

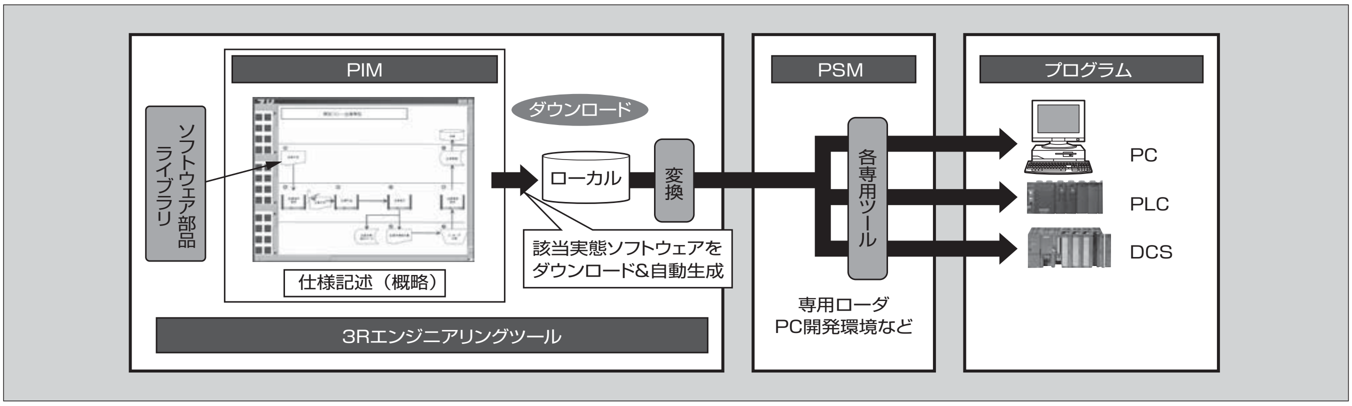
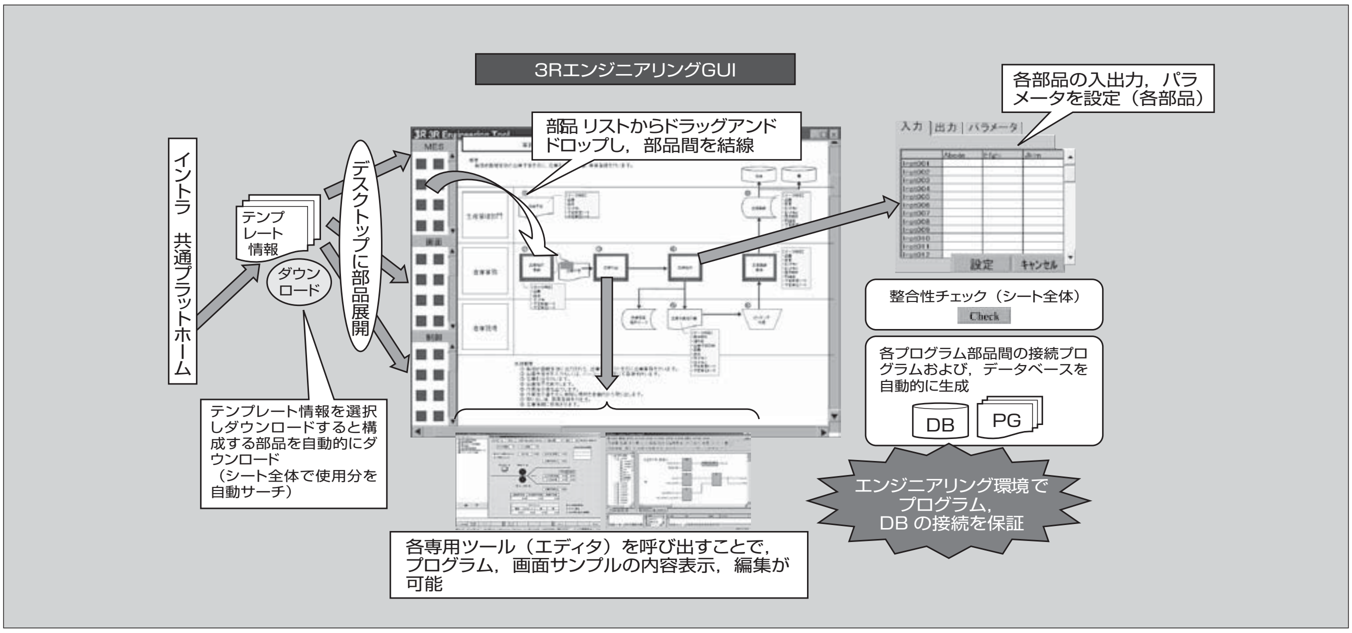


図6　3RエンジニアリングのGUIのイメージ（PIMイメージ）



特集

4.2　広域分散システムプラットフォームの 3R エンジニアリング

広域分散システム PF は複数業務を実装するため，開発環境として多言語対応が必要である。生産性の向上と高信頼度化を実現するために，従来からのシステム開発フレームワークを原点から見直し，新たなフレームワークの開発に取り組んでいる。このフレームワークを使ったシステムのエンジニアリングの流れを**図 7** に示す。

このフレームワークでは，過去のソフトウェア生産物を MVC（Model View Controller）モデル[(4)]を使って分類整理し，次の 3 点をライブラリへ登録し再利用できる環境を提供することで，従来とは異なり個人の力量に左右されない開発方式としている。

(a)　共通ソフトウェア部品
(b)　テンプレート（設計書，プログラムなど）
(c)　エンジニアリングツール（**図 8** のプログラム自動生成など）

特に画面のプログラムに関しては，従来は画面の多様さの影響もあり，製作者の経験や力量によりその作り方がバラバラで，その後の追加・改造などが複雑になって品質やコストに影響を与えていた。これを解消するために，**図 8** のプログラム自動生成ツールを提供している。画面の要件定義を元に，画面の仕様を画面定義ルールに従い XML で定義する。この定義とライブラリに分類整理された画面要素ごとのプログラム部品ソースを自動生成エンジンが検索・抽出・組み合わせて，目的仕様の画面プログラムを自動生成する Web 系画面の自動作成ツールである。これにより画面作成の自動化を行うことができ，一度作ったものは何度でも再利用することができるようになった。

流用・再利用するものは提供されるフレームワークで，分野ごとの業界標準的なデータモデルが適用できるため，そのインタフェースが共通化され，ソフトウェア資産の部品化が推進される。

このライブラリとフレームワークにより，実績に裏打ちされた高品質なソフトウェアが再利用できる。必要であればカストマイズを加え，顧客ニーズに柔軟に対応しながら，生産性の向上と高信頼度化が実現できる。

図 7　広域分散システムのエンジニアリングの流れ

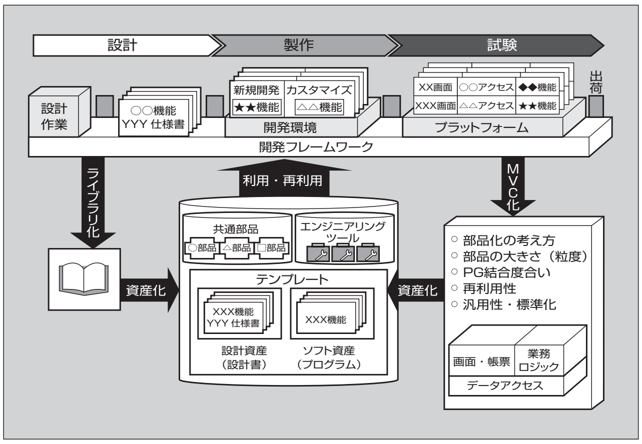
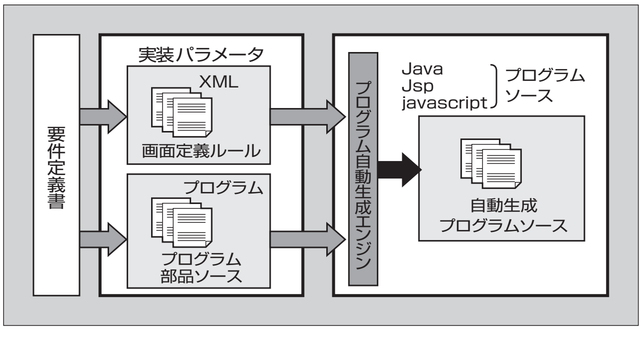


図 8　プログラム自動生成



4.3　3R エンジニアリングのライブラリ

3R エンジニアリングは，部品やテンプレートをライブラリとして登録流用を加速するための PF である。

ライブラリには部品やテンプレートが収納されている。その部品やテンプレートは取扱説明書とともに格納され，ユーザはライブラリの中の部品を使用目的に応じて選択することで，目的とする機能を実現できる。このライブラリには，コントローラ言語と C 言語の部品を自由に選択し，部品をつなぎ合わせることで，部品間の自動接続も実現してくれる。さらに構築した実行環境にダウンロードすることで，機種情報を定義することなく実行できる。

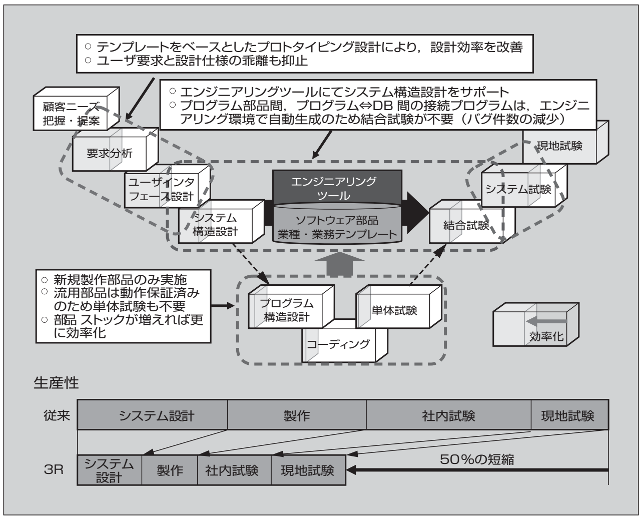
4.4　エンジニアリング業務フロー支援 BPR ツール

エンジニアリングを遂行する時，エンジニアリングツールだけの提供では品質・業務効率が十分に成果は出せない。制御システム PF では，使用するエンジニアリングユーザに対して，最適な業務フローを支援する BPR ツールを用意し，最適な業務の実現と高品質な業務遂行が実現できる。

4.5　3R エンジニアリングの効果

3R エンジニアリングは MDA 手法を採用したことで，PIM と PSM により，ビジネスモデルと PF を明確に分離

図 9　3R エンジニアリングの効果



できる。さらにPIM上にフレームワークを構築することにより，テクノロジーの変化の依存度を低減し，実行系が変わっても資産が継承できる再利用を維持できる。エンジニアリング方法の統一ができ部品の品質も均一化が図れるので，部品のブラッシュアップで再利用率が向上する。

図9に示すように，3Rエンジニアリングツールが，構造設計をサポートし自動的に部品間を接続してくれることで，プログラム構造設計，コーディング，単体試験が不要となり，高品質設計とリードタイムの短縮が図れる。

3Rエンジニアリングの効果として，顧客の要求にあった以下の効果が発揮できる。

⑴ スケーラブルなシステム提供

顧客の必要な機能を持ったシステムを，過去の実績あるソフトウェア資産を再利用して顧客の要求するスケーラブルなシステムが提供できる。

⑵ 安定したシステム品質

再利用するソフトウェア資産は過去の実績があるので，品質は安定している。テンプレートなどの実績あるシステム基盤を使っているため，新規に製作する場合でも，最大50%程度のプログラム量が減るだけでなく，バグ件数も少なくなり十分な品質を確保できる。

⑶ 短納期でのシステム稼動

実績あるシステムのベースをテンプレートとして再利用するので，システム開発の設計，製作，試験の期間を短縮し，従来に比較して，システム試験，現地試験工程を除くシステムの開発期間が最大50%程度短縮できる。

⑷ 保守の容易さ

常に進化する顧客システムの要求に，その時点で保有している最新のソフトウェアライブラリを有効活用して，タイムリーに品質良く素早く対応することができる。

⑸ 資産の継承

実行系が変わっても3Rエンジニアリングの環境の自動変換機能が連続性を維持するので，資産の継承ができる。

⑹ グローバル化への対応

部品化技術を進め，ビジネスパートナーの利用促進を加速するとともに，海外のエンジニアリングパートナーにも部品化されたノウハウが展開できるように，エンジニアリングツールのマルチ言語対応を行う。エンジニアリングツール側で言語テーブルを定義するだけで容易に言語変換されマルチ言語対応ができる。

5 あとがき

富士電機の新しい制御システムプラットフォームについて紹介した。エンジニアリングにおける要件定義は常に不変であるが，要件定義以降はハードウェアやソフトウェア技術の進化とともに最適なものへと変化していく。今後も，技術の進化を取り込んで高品質，高効率なエンジニアリング環境を提供していく所存である。

参考文献

⑴ 戸高雄二ほか. 計測制御システムの現状と富士電機の取組み. 富士時報. 2006, vol.79, no.3, p.243-247.

⑵ 吉野稔ほか. 生産性・品質向上のためのエンジニアリング支援システム. 富士時報. 2006, vol.79, no.3, p.270-273.

⑶ Stephen, M. et al. Principles of Model Driven Architecture. MDA Distilled. Addison-Wesley Professional. ISBN 0-201-78891-8, 2004.

⑷ 中村輝雄. J2EEシステム開発－MVCモデルからWebサービス構築まで. 日経Javaレビュー. 2002.

廣瀬 文彦

計算機制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エンジニアリングセンター副センター長。情報処理学会会員。

笹谷 俊幸

計測制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部産業システム統括部ソリューション技術第一部長。計測自動制御学会会員。

森 伸一郎

計算機制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エンジニアリングセンターＰＭＯ推進部主席。計測自動制御学会会員。

現場の安全を守る安全制御ソリューション

特集

Safety Control Solution that Protects Onsite Safety

小塙 明比古 Akihiko Kohanawa　　長谷川 正美 Masami Hasegawa　　金森　重晴 Shigeharu Kanamori

機能安全や機械安全の国際規格化を受け，国内の規格化や安全の取組みが活発化している。富士電機は，この国際的な安全基準と，システム制御で培ってきた高い信頼度や稼動率などを実現する基盤技術とを融合させた安全制御ソリューションを展開している。安全計装システムでは，リスクアセスメントに基づいたリスク低減対策によりSIL 3までの安全度水準を提供する。鉄鋼コイル搬送システムでは，要求安全度に応じた回路やコンポーネントの多彩な選択肢を用意している。電力系統では，高い信頼度のディジタルリレーが電力の安定供給を保つために貢献している。

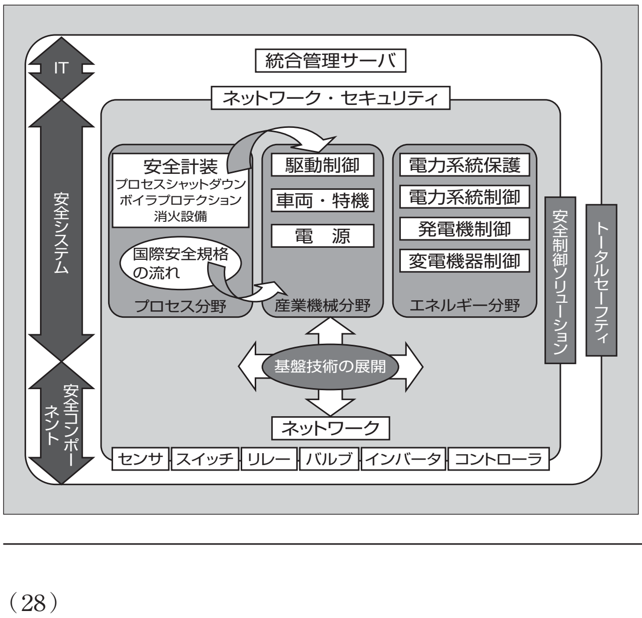
Efforts to establish safety standards and address safety in Japan have become more active as a result of the international standardization trends toward functional safety and machinery safety. Fuji Electric is developing a safety control solution that combines global standards with basic technologies, acquired from our experience with system controls, to realize high reliability and a high availability rate. With risk-reducing measures based on risk assessment, Fuji Electric can provide a safety related system having a safety integrity level of 3 (SIL 3). For steel coil transportation systems, a wide range of choices are available for the circuits and components according the required safety level. For power systems, highly reliable numerical protection relays help to maintain a stable supply of electric power.

1　まえがき

近年，欧州が発端で機能安全や機械安全規格による新しい考えの安全度の定量化，安全設計，安全認証，安全マネージメントによって，コンポーネントやシステム全体の安全を確保しようとする動きが活発化してきている。国内では，それらの国際安全規格が既にJIS化され，化学，石油，鉄鋼，自動車，発電など各産業界での取組みが進んでいる。

一方，富士電機の社会インフラに対する安全システムは，高信頼度化技術や稼動率向上技術，センシング技術，診断技術を中心に，その当時の先進的な考えの下に体系的に発達してきた。これは，エネルギー分野などのシステムの故障，誤動作が社会生活基盤を脅かす事態（電力供給の停止など）を未然に防ぐためである。

図1　安全制御のスコープ



富士電機の安全制御のスコープを**図1**に示す。富士電機が培ってきた安全技術を基盤とし，その上に新しい考えの国際安全基準を融合させた技術を生かした安全制御ソリューションとして展開をしている。

フィールドセンサなどの安全コンポーネントや制御の安全性を高めるシステム，それらを統合管理するITによるトータルセーフティにより，現場全体の安全を守るソリューションの構築を目指す。

本稿では，安全の基盤技術の構成を示すとともに，スタンダード化が促進される安全技術を概説して，富士電機の安全への取組みの全容を具体例で示し，提供する安全制御ソリューションの有効性を示す。[(1)]

2　安全制御の取組み

2.1　富士電機の安全基盤技術

富士電機は，エネルギー分野の電力設備の保護・制御システムなどに安全基盤技術を適用している。

富士電機の持つ，高信頼度化，センシング，診断・解析技術などの安全の基盤技術は，その理論的研究も含めて独自に発展させてきた。例えば，**図2**に示すように災害などによる電気事故から電力設備を高速で保護するために高性能なディジタルリレーが使われている。この安全に関する基盤技術の特長を次に示す。

(a)　高速で検出量の成分を分析・選択可能な高性能センシング
(b)　一つの故障では誤動作しない高信頼のシステム構成
(c)　ハードウェアの故障率を低減・高寿命化させる技術
(d)　装置外の機器故障まで診断する広範囲な自動監視
(e)　一過性故障の過剰検出を防ぐ稼動率の向上技術
(f)　操作ガイドや事故データの解析などの保守支援技術

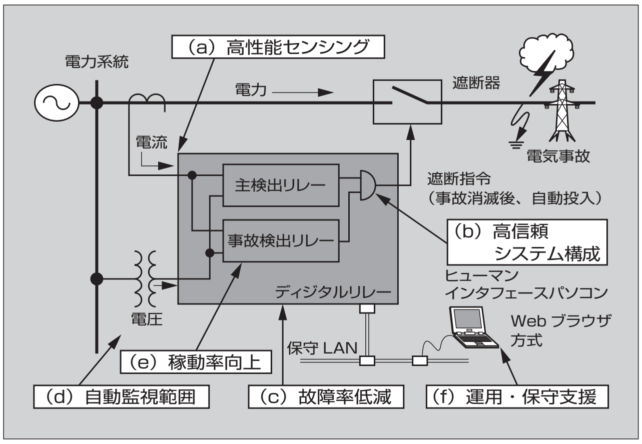
このように，電力設備の安全技術は高い信頼度を実現するものである。この技術を他の分野へも応用を広げる取組みを始めている。

2.2　富士電機が目指す安全制御ソリューション

高信頼度化技術などによる安全の基盤技術と国際安全基準に沿ったリスクアセスメント，フェールセーフの考え方を融合することにより，コンポーネントとシステムの安全性と経済性を評価しながら，個別最適から全体最適へと進むことができる。その運用・保守から得られるデータを効果的に活用していくことも可能である。

富士電機は，これらを実現する技術を持っており，安全技術の統合による安全制御ソリューションの構成を**図3**に示す。安全制御ソリューションは，多くの安全制御技術によって実現される。マネージメント技術は，現場の安全を実現，維持する体系立った安全管理が特徴である。制御技術とコンポーネント技術は，安全制御を実現する安全設計の固有技術である。さらに，見える化技術には製品（システム・コンポーネント）の安全を定量的に表す指標や算出の手法がある。

図2　ディジタルリレーの安全に関する基盤技術

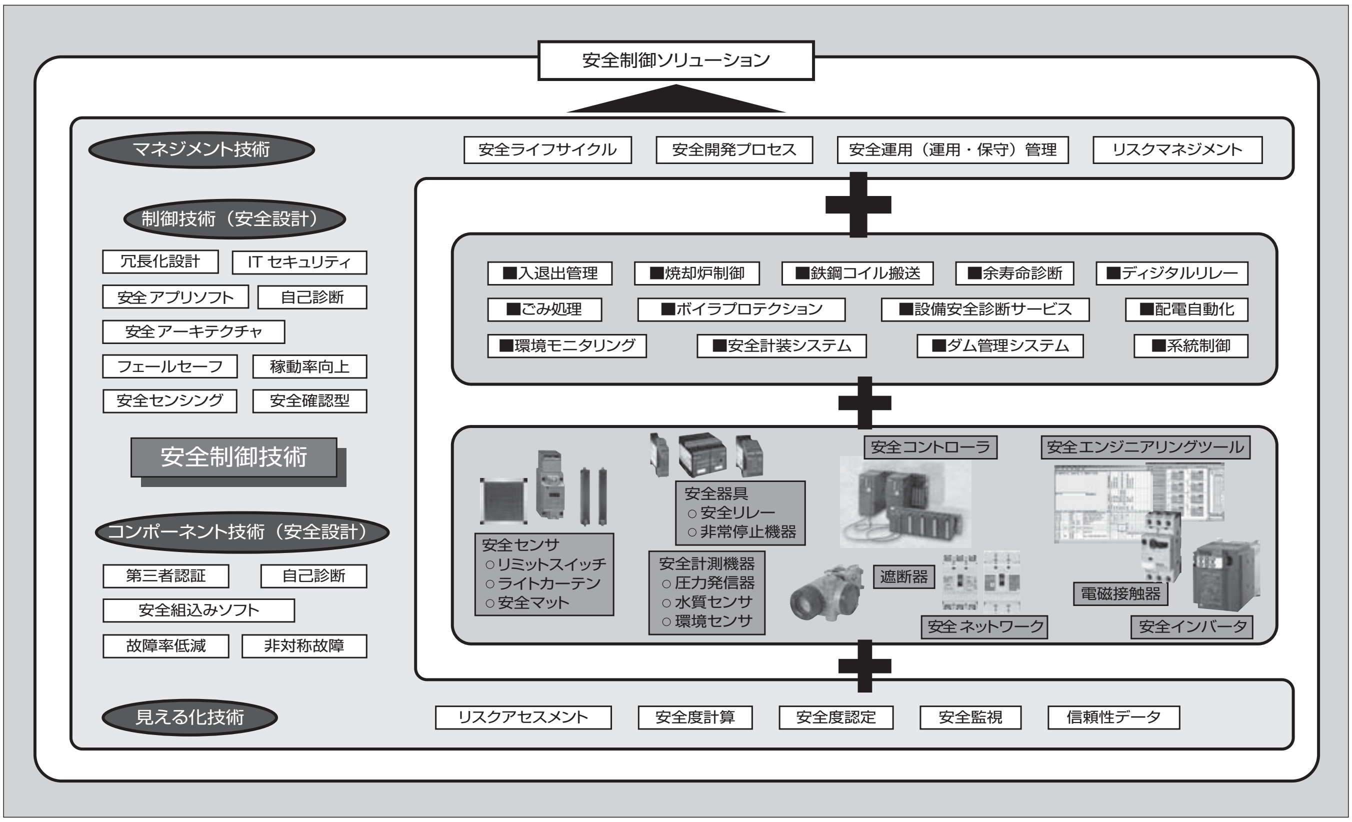


3　安全制御ソリューションを実現する安全制御技術

3.1　安全マネージメント技術の例

現場に安全制御を計画，導入，運用していく際の管理，適合確認，文書化を進める安全マネージメントとして，機能安全規格 IEC 61508 に規定される安全ライフサイクルがある。これには，機能安全を実現するための要求事項（作業）を整理した 16 個の作業フェーズが定義されており，システムを立案・計画する概念フェーズから，リスク解析フェーズ，システムを設計・製作する実現フェーズ，運用フェーズ，保守・改修フェーズ，廃却などフェーズなどに至るまでがある。この安全ライフサイクルに従うことで，各作業での抜けや間違いの防止，目標安全度を持った安全制御システムの構築，長期にわたる運用，維持が可能となる。富士電機は，安全マネージメントのコンサルティングを通して，IT を活用した安全度の見える化を提案する。

図3　安全制御ソリューションの構成



3.2　安全システム技術の例

⑴　安全設計

安全設計は，コンポーネント，制御の安全を確保する高信頼度化技術が基本である。危険側故障率の低減，安全確認型，フェールセーフ，非対称故障などの安全設計技術や安全設計理論によって実現される[2]。

⑵　冗長化設計

冗長化設計は，コンポーネントやシステム系に故障が発生していたとしても，安全制御システムの機能を喪失させないための重要な設計手法である。機能安全規格は，安全度水準〔SIL：Safety Integrity Level（69 ページの「解説1」参照）〕に見合った冗長化設計（69 ページの「解説 2」参照）を要求している。この考えは，コンポーネント内部の安全回路設計にも適用される。また，ライフラインのようなシステム停止を絶対に避けなければならない分野で有用である。

⑶　高性能センシング

安全制御を実現する場合，その計測対象の性質，許容誤差，必要な応答性，誤検出要因の選択・除去などを検討する。ノイズを内在したままの検出量では誤動作につながる恐れがある。

3.3　安全コンポーネント技術の例

⑴　自己診断技術

コンポーネント自身が内部回路などの異常を確実に検出できることが，信頼性を高め，安全性を確保する。自己診断の能力は，安全側故障割合（SFF：Safety Failure Fraction）や自己診断率（DC：Diagnostics Coverage）といった指標で表される。富士電機は検出できない故障（危険につながる故障）をできるだけ少なくするために，高度な診断技術開発に取り組んでいる。制御系におけるコンポーネントの異常監視，通信線の異常監視などにも自己診断を適用している。

⑵　安全コンポーネント

(a)　圧力発信器

従来製品（FCX-AⅢ）に対して FMEDA（Failure Modes Effects and Diagnostic Analysis）を実施し，内部の構成部品に対して故障モード，故障率，故障による影響を分析した。分析結果から，自己診断によって検出できない危険側故障率 λ_{DU} を求め，機能失敗平均確率〔PFDavg：average Probability of Failure on Demand（69 ページの「解説 1」参照）〕を算出した。PFDavg の妥当性はドイツの第三者認証機関の TÜV SÜD で評価し，SIL 2 のテクニカルレポートが発行されている。現在，SIL 3 の認証を持つ次世代圧力発信器を開発中である。

(b)　安全インバータ

駆動分野の安全制御の中核コンポーネントである。富士電機は既に欧州安全規格 EN 954-1 Cat.3 の認定品を提供している[3]。さらに駆動系の停止カテゴリを細分化した高度な ISO 13849-1 PLd/IEC 61508 に適合した製品を開発しており，国際的なすべての駆動システムの安全制御要求に対応していく予定である。

(c)　電磁接触器

電磁接触器は安全停止の最終段スイッチとして高信頼性の評価を受けており，ユーザへ故障率データを提供している。安全アプリケーション用のフィードバック回路にミラーコンタクト（補助 N/C 接点）を装備している。ミラーコンタクトは，主接点の溶着時に，コイルが非励磁状態で補助 N/C 接点が閉路することを防止するものである。この機能により，従来できなかった電磁接触器の主接点の溶着を検出することができ，IEC 60204-1（JIS B 9960-1）の安全要求事項に適合している。

3.4　安全の見える化技術の例

⑴　リスクアセスメントと安全管理

リスクアセスメントは，必要な安全度を知る上で重要な手法である。リスクの存在や大きさが分かることで，コストと安全のバランスがとれた最適な安全制御システムが導入できる。富士電機は，安全制御システム導入時のリスクアセスメントの取組みを強化している。

⑵　安全の定量化

安全制御にかかわるコンポーネント，システムの安全性を定量的に評価する尺度が規格化され，ここ数年間で，国際安全基準に従った安全度を取得した製品が出始めている。システムやコンポーネントの安全度には，SIL と PL〔Performace Level（69 ページの「解説 1」参照）〕の大きく 2 つの指標があり，その対応関係を**表 1** に示す。富士電機は，各規格に準拠した安全度（SIL，PL）を持ったコンポーネントを開発し発売している。また，SIL 3 までのシステム構築を手掛けている。

表 1　規格をまたがる定量化指標の種類

SIL* IEC 61508 （SIL1 ～ 4） IEC 61511 （SIL1 ～ 3） IEC 62061 （SIL1 ～ 3）	PFDavg* IEC 61508 IEC 61511	PFH（/h）* IEC 61508 IEC 61511 IEC 62061	PL* ISO 13849-1 2006	リスク軽減 （PR）の 目標
4	10^{-5}以上 10^{-4}未満	10^{-9}以上 10^{-8}未満	－	10,000 < RP=< 100,000
3	10^{-4}以上 10^{-3}未満	10^{-8}以上 10^{-7}未満	e	1,000 < RP=< 10,000
2	10^{-3}以上 10^{-2}未満	10^{-7}以上 10^{-6}未満	d	100 < RP=< 1,000
1	10^{-2}以上 10^{-1}未満	10^{-6}以上 10^{-5}未満	c b	10 < RP=< 100
－	－	－	a	

＊：SIL，PFDavg，PFH，PL：69 ページの「解説 1」参照

4　安全制御ソリューションの具体例

4.1　安全制御を実現する計装ソリューションの例

プロセス分野の安全制御の代表的なものが，安全計装システムである。国際基準に基づいたリスクと安全の定量化，そして安全設計による高い安全性を実現し，プラントの予期せぬ事故やトラブルから人・環境・設備を保護するシステムである。主に，緊急シャットダウンシステムやインタロックシステム，バーナーマネジメントシステム，タービンプロテクションシステムに適用される。富士電機は，化学プラントや石油プラント，鉄鋼プラント向けのインタロックシステム，緊急シャットダウンシステムへ取組み強化を図り，設備保護を主目的としたボイラプロテクションシステムにも注力している。本項では，富士電機が2008年度に受注した某ユーザ向け蒸気タービンに使用されるタービンプロテクションシステムに安全計装システムを適用した事例を通して，富士電機の技術と特長を述べる。

(1)　蒸気タービンを保護する安全制御の構成と技術

タービンプロテクションシステムは，稼動しているタービンの運転を複数のフィールドセンサで検知し，危険な状態のときにタービンの損傷事故を防止する安全制御システムである。安全設計したタービンプロテクションシステムの全体構成を**図4**に示す。安全制御の概要は，タービンの異常をセンサで検出し，そのデータを専用の安全コントローラで演算する。危険と判断したときに，タービン駆動の蒸気を遮断する弁を閉じる独立した安全制御システムであり，安全制御ループは全17ループある。このシステムには次のような安全制御技術が設計に適用されている。

(a)　リスクアセスメント

タービンプロセスのリスクアセスメントの過程で次に示すのプロセスリスクを抽出した。

①　スチーム圧力高
②　シャフト振動異常
③　タービンオーバースピード
④　復水器水位高
⑤　ベアリング温度高
⑥　スチーム温度低
⑦　シャフトポジション異常
⑧　発電周波数異常

(b)　リスク低減施策

富士電機は従来，汎用PLC「MICREX-SX」の制御で上記のリスク低減を実現していた。今後，タービンプロテクションシステムへはSIL指定が標準的に採用されると予測される。今回のリスク低減も国際基準であるSILが指定された。SILを持ったシステムを実現するには安全制御部を独立させ，リスクアセスメントに基づいたリスク低減対策を採用する必要がある。**図4**に示す構成例により必要なリスク低減を実施した。

(c)　自己診断技術

システム，コンポーネントの故障を早期に検出するために安全制御システムの中核となる技術である。富士電機が持つ**図5**の安全コントローラ「MICREX-NX Safety」は第三者認証機関のTÜV SÜDからSIL 3の認証を受けおり，CPU部，I/O部に，多様な自己診断機能を持っている。

(d)　安全システム設計

タービンプロテクションシステムの安全計装システムには安全性（停止させる）と可用性（誤トリップ率防止）を両立させることが重要である。システムアーキテクチャの選択を安全性と可用性の割合で設計する。本システムでは検出部を2oo3構成とし，高い安全性と可用性を両立し，出力部は，停止指令により確実にシャットダウンする1oo2構成を採用した。構成の違いで**図6**に示すような設計故障確率の違いが出る。

(e)　安全度の定量化

システム全体のリスク低減施策を選択する上で安全度の定量化は重要である。安全度は，検出部から出力部までの全体でPFDavg値を計算して確定させる。計算した結果が目標SIL内に入らない場合は追加の対策を施す。本例でも，初回の計算でPFDavg値が目標SILに入らず，目標を達成するためのエンジニアリング（製品を変える，構成を変える，試験方法を変える）を実施し，

図4　タービンプロテクションシステムの全体構成

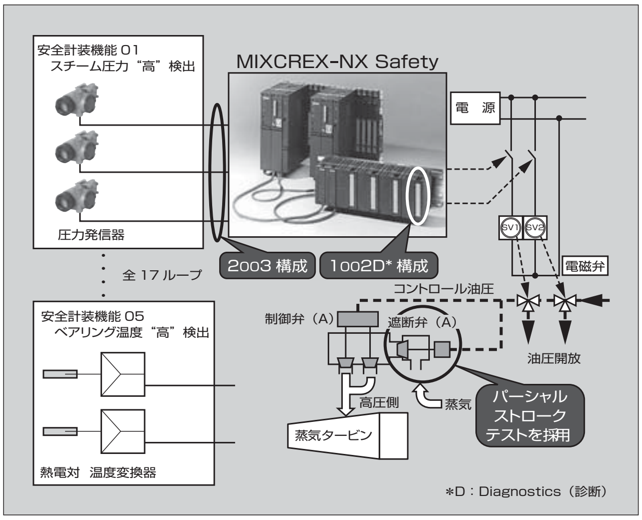
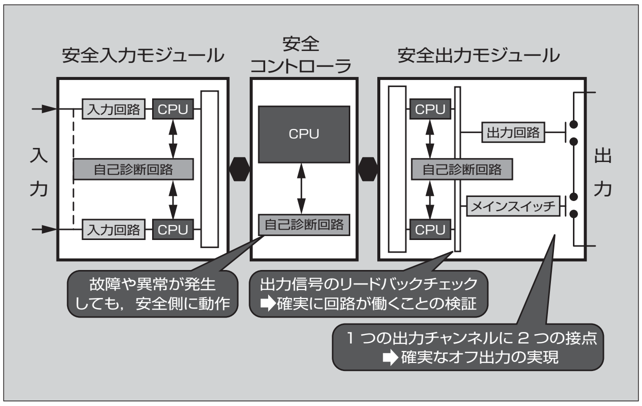


図5　「MICREX-NX Safety」の自己診断



最終的に作成した計算書が目標SILを満足していることを第三者認証機関によって確認した。

(2)　安全制御の課題と解決策

安全計装システムを構築しようとする場合，次の課題がある。

(a)　使用実績によるコンポーネント選択

安全計装システムの設計では，SIL認証されたコンポーネントや故障率が必要になるが，すべてをSIL認証品で構築できない問題がある。本例で使用したセンサ，電磁弁，遮断弁は，富士電機が使用してきた実績ある製品だが，SIL認証品ではなく公的故障率データがない。このような場合の安全度の定量化の課題解決には，次のような方法がある。

① 故障モード解析で算出
② MIL規格（Military Standard：アメリカ国防総省が制定）などの故障率ハンドブックを参照
③ 製品MTBF値から計算

本事例では③を採用し，MTBF値の信頼性を上げるため，統計処理（χ二乗法）も採用している。この場合，採用した故障率の算出根拠を明確にした技術資料を残す必要がある。

(b)　パーシャルストロークテスト（PST：Partial Stroke Test）

一般的にバルブの安全度は低いとされるので，バルブの安全度を高めることが，システム全体の安全度改善になる。本システムのバルブ（遮断弁）は富士電機製で，油圧駆動の機械式である。このような製品の安全度を改善する手法に次のようなものがある。

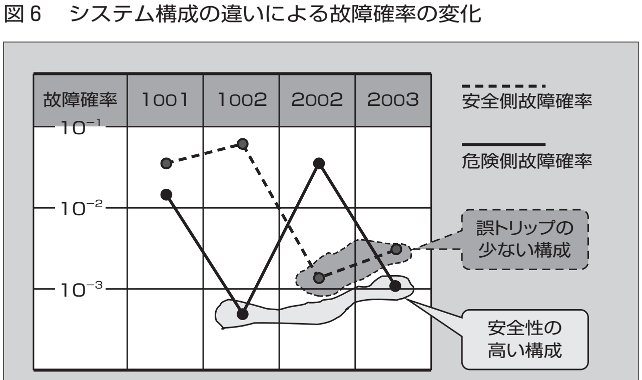
① 機器を変更
② 冗長化設計
③ プルーフテスト間隔短縮
④ PST

タービンの機構上の問題から③を採用したが，年1回が発電機停止の限度で，さらなる改善のために④の手法も導入し，PFDavg値の改善を図った。

① 年1回のプルーフテスト時：2.13×10^{-3}
② ①と週1回のPST時：8.76×10^{-4}

PSTは，プロセスを止めずにバルブの機能安全を確認する部分作動検査である。駆動部の固着防止などのメリットもあり，今後取り組みの増える技術である。

図6　システム構成の違いによる故障確率の変化



以上のように，安全制御のエンジニアリングには専門知識・経験が必要であり，富士電機ではこのような安全エンジニアリングを行っている。

(3)　有効性と適用拡大

富士電機は，安全コンポーネント，安全システム構築，自己診断技術，安全度計算技術，エンジニアリングなど広い技術を持っている。運用段階での保守サービス，設備診断サービスなどの安全運用管理までを提供できる。上述の富士電機の安全制御ソリューションは“トータルセーフティ”としてユーザの現場の全体/部分，および新設/既設システムの安全制御を広範囲に提供できる特長がある。石油・化学プラントばかりでなく，鉄鋼，食品/飲料製造，半導体製造，社会システム分野へも適用拡大をしていく。さらに燃焼安全装置の分野へも富士電機は工業用燃焼炉の制御，インタロック回路へ安全コントローラの適用拡大を図っている。

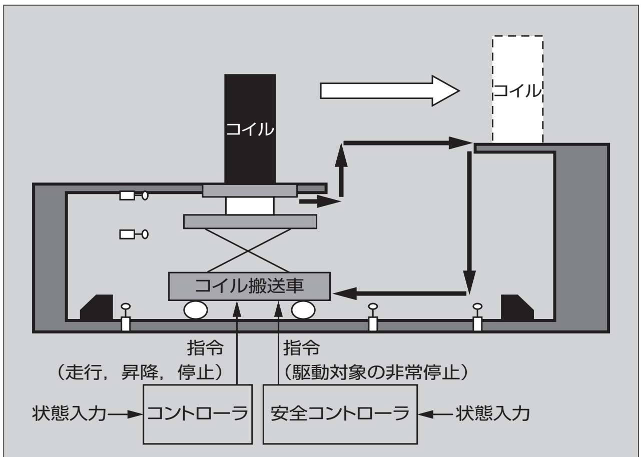
4.2　安全制御を実現する駆動制御ソリューションの例

産業機械分野においても安全規格の改訂や「改正労働安全衛生法」の施行などにより，国際安全標準の考え方に対応する必要がでてきている。IEC 62061は，IEC 61508から派生し，機械の安全制御に特化した機械類の機能安全規格である。この規格の適用を検証した事例を述べる。

(1)　鉄鋼コイル搬送システムの安全制御の構成と技術

搬送システムの全体構成を**図7**に示す。このシステムでは，インバータによる走行モータ制御と油圧ポンプ/電磁弁による昇降制御を行っている。従来ハードリレーによる安全回路として非常停止機能を持っていた。この電気制御システム（SRECS：Safety Related Electrical Control System）について検証した結果，ハードリレーによる安全回路には，安全度は適用できず，また，リスクアセスメントで抽出したリスクを低減する対策がないということが分かった。これに対し，1oo1構成として要求安全度SIL 1を達成するシステムには，次のような安全制御技術が適用可能である。

図7　鉄鋼コイル搬送の安全制御の構成



(a)　安全の定量化

リスクアセスメントによるコイル転倒やメカストッパへの衝突などのハザードを抽出した。安全対策として非常停止機能および位置検出機能の信頼性を向上させる必要性を明確化する。

(b)　リスク低減施策

安全制御回路部と通常制御部の機能分担を明確に分離して，安全制御回路部に安全コントローラを適用して信頼性を向上させる。危険信号の断線や入力回路電源喪失時でも安全側（非常停止側）に動作するフェールセーフ設計とする。

(2)　有効性と適用拡大

検証結果により，要求安全度やコストに応じてコンポーネントおよび自己診断範囲や冗長化の選択を定量的に明確にすることができた。さらに，最新の安全インバータなどの適用により，出力側コンタクタの削除や位置決め制御，揺れに対応する制振制御なども導入可能とするなど，富士電機の安全制御システムの選択肢が広がっている。

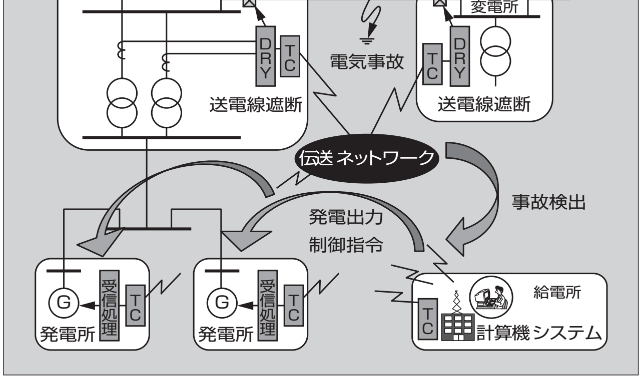
4.3　高度な安全制御を実現する電力系統保護の例

電力分野は，古くから電力供給の安全制御に取り組んできた。電力系統は広範囲なネットワークであり，供給と需要のバランスが崩れると大規模停電となるリスクがある。[(4)]電気的な事故時に必要最小区間を高速判定して系統から切り離す高度な安全制御が必要である。区間の切り離しに失敗した場合でも上位区間でバックアップするなど，系統全体の安定維持を短時間で最適制御している。

(1)　電力系統を保護する安全制御の構成と技術

電力系統を保護する富士電機の安全制御の構成を**図8**に示す。主な構成装置は，ディジタルリレー，テレコン，計算機システムである。ディジタルリレーは，複合機能を持つインテリジェント端末であり電力設備の保護および系統からの切り離し機能，系統全体の安全維持のために計算機システムへ異常を伝達するフィールドセンサの機能を併せ持っている。伝送ネットワークは，テレコンにより発電所や変電所などを大災害時の伝送渋滞のリスク回避のため専用回線で結んでいる。計算機システムは，電気事故発生時に電力供給支障量を最小にする操作手順を通知し系統運用者を支援する機能や，系統システム全体を最適とする機能を持っている。安全制御技術は，以下のように適用している。

図8　電力系統を保護する安全制御の構成



(a)　高性能センシング

フィールドセンサは，事故の電気量を0.2 ms程度でサンプリングする高速性能を実現し，不要高調波ノイズを除去して特定の周波数を選択するアルゴリズムを搭載したディジタルフィルタ技術を導入している。

(b)　フェールセーフ

事故判定の信頼性を向上させるため，CPUを二重化して異なる入力量の組合せアルゴリズムを搭載，AND制御出力としている。

(c)　最適冗長化設計

各装置の構成は，リスクの高さにより冗長化を判断して，信頼性と経済性を両立させている。経済性を優先できる場合は，保護・制御機能を一体化する。

(d)　トレーサビリティ

解析により原因の究明や運用技術向上などの安全管理ができるようにするため，事故や装置故障前後の詳細な記録データを残している。

(2)　信頼度向上技術

ディジタルリレーは，高圧，大電流から直接センシングする現場で安全に運用管理するため，独自に故障発生率，誤不動作率などの信頼性データの蓄積，評価している。

電気協同研究[(5)]のデータによれば，全国6,940台の稼動で故障発生率3.51×10^{-6}件/h，誤不動作率4.75×10^{-5}件/hである。現在の富士電機が納入している600台以上の稼動実績では，故障発生率1.47×10^{-6}件/h，誤不動作率1.98×10^{-5}件/hである。各種条件を整理，換算して機能安全規格にて検証してみると，故障率1.47×10^{-6}件/h，機能失敗平均確率7.55×10^{-4}件/hとなり，ハードウェア故障許容（HFT）も1oo1のループ構成で自動監視機能の検出率が9割を超えるため，**表1**のPFDavg値（低頻度動作）のSIL 3に相当する。

SIL 3を実現する要素として以下の安全技術がある。

(a)　部品故障率の低減

特に摩耗寿命の延命，初期故障の除去策として，部品点数の削減，高温エージング，温度上昇抑制設計をしている。

(b)　共通原因故障（EMC）対策

ノイズ発生源の解析をもとに外部ノイズ侵入を防ぐコンデンサ端子台やフィルタによる外部および内部ノイズの低減を実施している。

(c)　稼動率向上対策

故障モード解析により，一過性のメモリ不良などの故障メカニズムが判明しているものは，CPUリスタートによる再起動にて運転を継続している。

(3)　有効性と適用拡大

このような故障率の低減，自己診断機能や保守支援の充

実により，ユーザの定期点検周期を6年に延長するニーズに応えており，保守業務の省力化にも貢献している。

富士電機は，電力系統のセンサ機能から伝送設備および計算機による大規模な保護制御技術までのトータルな安全制御技術を持っている。その応用は，省エネルギー計測，電力品質の監視・解析，自然エネルギー安定化制御などトータルなエネルギーソリューションに及んでいる。今後，スマートグリッドなどの複雑化する分散電源の電気エネルギーは，その調整や制御を間違えばグリッド内だけではなく電力系統の安全にも影響を及ぼす。これを踏まえ，安全制御技術の適用を拡大していく。

5　あとがき

現場の安全を構築する安全制御ソリューションにおける富士電機の取組みと具体例について紹介した。

現在，安全は現場の安全管理活動により確立されている部分が多い。今後この活動に加えて，本稿で述べた安全を造り出す技術の取込みによって，安全性と生産性の高信頼度化を図る。また，1980年代に稼動した設備などは，熟練した保全技術者により安全運転を確保しているのが現状である。これら設備のリプレースでも，たとえ部分的であっても安全制御を導入することで，経験の少ない保全技術者でも安全操業を確保できる効果がある。

今後，種々の分野へ適用できる安全を付加したソリューションを提供していく所存である。

参考文献

(1)　斉藤純一郎ほか. 安全で安心なものづくりを実現するセーフティインダストリオートメーション. 富士時報. 2009, vol.82, no.5, p.13-16.

(2)　関口隆, 佐藤吉信. 機械安全（電気装置）/機能安全. 実用マニュアル. 日刊工業新聞社. 2001-01.

(3)　酒井利明ほか. 汎用インバータとサーボシステムの最新技術. 富士時報. 2009, vol.82, no.2, p.133-139.

(4)　過負荷保護技術調査専門委員会. 過負荷保護技術. 電気学会技術報告. 第1069号.

(5)　第二世代ディジタルリレー専門委員会. 第二世代ディジタルリレー. 電気協同研究. vol.50, no.1.

小塙 明比古

エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エンジニアリングセンター長。電気学会会員，電気設備学会会員。

長谷川 正美

機能安全，安全計装分野の開発・設計業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エンジニアリングセンター制御・安全システム第一部主査。計測自動制御学会会員。

金森　重晴

電力流通分野の開発・設計業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エンジニアリングセンター制御・安全システム第二部長。電気学会会員。

効率と品質の向上に寄与するモデリングと制御技術

Modeling and Control Technology for Improving Product on Efficiency and Quality

勝野　徹 Tohru Katsuno　　松本　宏治 Kouji Matsumoto　　松井　哲郎 Tetsuro Matsui

近年，オートメーションシステムに対して，品質や安全性に対する要求がますます厳しくなってきている。富士電機は高度なモデリング技術や制御技術を用いることにより，これらの課題解決に向けて積極的に取り組んでいる。製造プロセスの異常診断や製品品質の推定が可能な多変量統計的プロセス管理・品質シミュレーションパッケージの開発，富士電機独自の外乱オブザーバ機能の開発，およびモデル予測制御の汎用 PLC への実装を行っている。これらのモデリング技術と製品で，製造やプロセスオートメーションの高度化に貢献している。

Requests for quality and safety in automation systems have recently intensified more than ever. Using advanced modeling and control technologies, these are actively worked to overcome the challenges in Fuji Electric. A multivariate statistical process control and quality simulation package which is able to diagnose anomalies in a manufacturing process and estimate product quality, and a proprietary disturbance observer are being developed and installed in general-purpose PLCs used for model-based predictive control. These modeling technologies and products will contribute to the realization of more advanced manufacturing and process automation.

1　まえがき

オートメーションを高度化する制御技術は産業応用分野にとどまらず，民生用の自動車や家電品にまでもその応用が広がっている。高度化制御技術として，2 自由度 PID 制御，非干渉 PID 制御，H ∞制御，ファジイ制御，ニューラルネットワーク（ニューロ）制御，カオス技術など多種多様な技術が挙げられる[(1)]。富士電機においてもニューロ制御を用いた電力予測・ダム流入量予測，ファジイ制御を用いた浄水場薬品注入制御，ファジイクレーンなど多くの製品に高度化制御技術やモデリング技術を用いてきた。特に近年では，製品に対し，品質や安全性に対する要求がますます厳しくなってきている。このような課題に対し，複数の入力変数間の相関を考慮した品質管理が実現できる多変量統計的プロセス管理（MSPC：Multivariate Statistical Process Control）[(2)]技術や，非干渉系で制約条件を加味した多変数制御が可能であり，制御安定性に優れたモデル予測制御（MPC：Model Predictive Control）[(3)(4)]が実プラントに用いられている。富士電機においてもこれらのモデリングをベースとした MSPC 技術や MPC 技術について積極的に取り組んでいる。MSPC では薄膜太陽電池の高効率化を図るための品質シミュレーション技術に適用して効果を上げている。また，MPC については水処理・鉄鋼・化学などのプロセス制御分野に適用を進めるため，外乱オブザーバ機能を開発し組み込んだ。さらに，中小規模のプラントや機器の制御にも MPC を適用するために，PLC（Programmable Logic Controller）への実装を行った。

本稿では，オートメーションを高度化するモデリングと制御技術として，MSPC[(5)]および MPC[(6)]の取組みについて述べる。

2　多変量統計的プロセス管理（MSPC）の取組み

2.1　MSPC を適用した品質管理

製造業においては，より高いレベルの品質管理が求められている中で，一般的には製造された部品や製品を検査し，要求品質を満たさない製品を検出している。しかし，製造された結果の良否を判定するだけでは，製造工程のどの工程が不良発生の原因になったのかが分からないので製品の歩留りが改善できない。

そこで，製造プロセスにおいて異常を早期に検出し，製造現場にフィードバックして不具合の発生原因を取り除こうとする取組みや，製品品質の変化を早期に発見し品質を向上させようとする取組みが行われようとしている。これには大きく分けて，次の二つのアプローチがある。

(a)　製造プロセスの異常診断

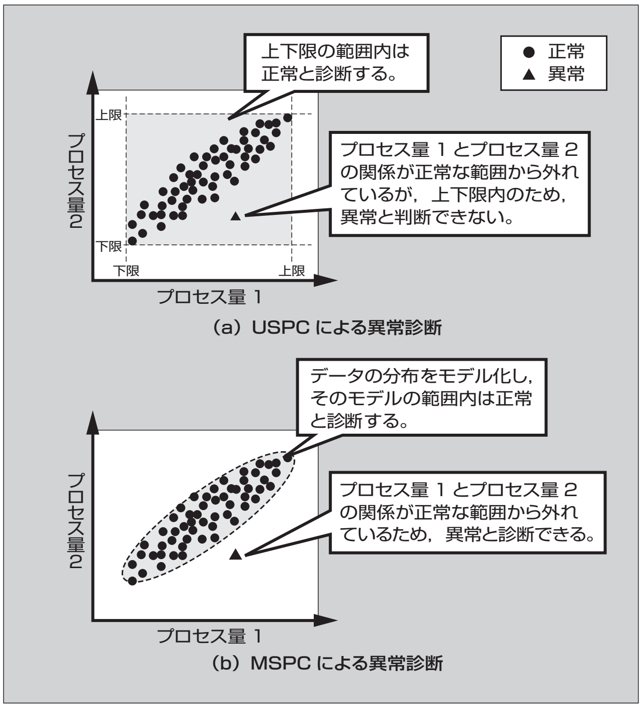
(b)　製造プロセス情報を用いた製品品質推定

2.2　製造プロセスの異常診断

製造プロセスの異常診断には，統計的プロセス管理（SPC：Statistical Process Control）手法を用いる。診断に際しては，センサで計測した各プロセス変数に対して正常範囲を規定する上下限値を設定し，プロセス値がこれを超えた場合にアラームを発して異常を通知する。

従来の SPC においては，監視対象のプロセス量をそれぞれ一変数ごとに上限値と下限値の範囲内にあるか否かで異常診断を行う，一変量統計的プロセス管理（USPC：Univariate SPC）が利用されてきた。しかし，例えば二つの変数が相関を持っていた場合に，それぞれの値が上限値と下限値の範囲内に入っていたとしても，二つの変数が相関関係から外れているような異常もありうる。このような場合には，USPC では異常が発見できず，**図 1** に示すよう

図１　USPC と MSPC の比較



(a) USPC による異常診断

(b) MSPC による異常診断

な多変量の相関関係を考慮した異常診断を行う手法が必要である。このための手法として，多変量統計的プロセス管理（MSPC）が用いられる。

MSPC の一手法である主成分分析（PCA：Principle Component Analysis）は多数の変数を変数間の相関に基づいて，情報量を直交する主成分に集約することで，少ない変数で表現する手法である。PCA を異常診断に適用する際には，Q 統計量と T^2 統計量の二つの指標を用いる。

Q 統計量は以下のように算出される。

$$Q=\|x-\hat{x}\|^2=\sum_{n=1}^{N}(x_n-\hat{x}_n)^2 \quad \cdots\cdots(1)$$

ここでは $\hat{x}$ 入力変数 x の PCA モデル上の推定値である。

Q 統計量はモデル作成データが持っていた変数間の相関からの逸脱を評価する指標であり，この指標を監視することにより“異常”の検出を行うことができる。

また，Q 統計量の各要素は Q 統計量への各入力変数の寄与度を表し，検出された異常がどの変数によってもたらされたのかを寄与プロット[2]から知ることができる。

次に T^2 統計量は主成分スコア t_m を用いて，以下の式で算出される。

$$T^2=\sum_{m=1}^{M}\frac{t_m^{\,2}}{\sigma_{t_m}^{\,2}} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで σ_{tm} は m 番目の主成分スコアの標準偏差を表す。

T^2 統計量は元の変数を圧縮して得られる主成分空間内において，平均から各サンプルまでの距離に対応しており，モデル（相関）の範囲内での平均からの乖離（かいり）度を表す。これにより，変数間の相関は保たれているが平均からの乖離（振幅）が大きいことにより，“異常”を検出できる。

2.3　製造プロセス情報を用いた製品品質推定

製造プロセス情報を用いた製品品質推定とは，重回帰分析に代表される多変量解析と呼ばれる手法を用いて，製造プロセスの運転状態や製造条件の設定値などを元にプロセスの状態と製品品質の相関関係をモデリングし，これによりプロセスの状態から最終製品の品質を推定するものである。

(1)　重回帰モデルによる品質推定

重回帰モデルは出力変数（目的変数）を入力変数（説明変数）の線形和で近似するものであり，製造品質推定のみならず非常に多くの産業分野において，各種の予測や診断に適用されており，モデル式を直感的に理解しやすいという特長がある。

一方で，重回帰モデルでは，説明変数間に相関がある多重共線性を持ったデータの場合には，数値的に不安定になり安定したモデルが得られにくい。このような場合に適切なモデルを作成するためには，入力変数の中から相関のある変数を除去する必要がある。従来は相関分析などの事前分析を行い，その上で重回帰モデルに用いる変数を絞り込むという手順が一般的であった。特に入力変数が多い場合には，入力変数同士が相関を持つ傾向が強くなるが，除去すべき互いに相関のある入力変数の組み合わせも多くなり，これを手動で行うのは非常に大きな労力がかかっていた。

(2)　部分的最小二乗法（PLS）モデルによる品質推定

PLS（Partial Least Squares）は，1983 年に Herman Wold と Svante Wold により経済学の分野で開発されたモデリングの方法である。入力変数同士に相関がある場合にも，それらを潜在変数と呼ばれる中間変数に集約した上で出力変数を表現するため，多重共線性がある場合でも，安定したモデルが得られることが特長である。

また，PLS モデルでは入力変数が多い場合でも，重回帰モデルにように事前分析で入力変数を絞り込む必要がなく，そのまま全変数を用いて簡単にモデルを作ることができる。このため，モデル作成の手間を大幅に軽減できる。

PLS モデルは，次に示すように入力変数から潜在変数を介して出力変数を回帰式として表すことができる。

$$t=(W^TP_C)^{-1}W^Tx \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\hat{y}=Q_Ct=Q_C(W^TP_C)^{-1}W^Tx \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで，x は入力変数，t は潜在変数，$\hat{y}$ は出力変数推定値であり，いずれも１サンプル分の縦ベクトル，W は重み行列である。P_C，Q_C は入力変数と出力変数に関する係数行列である。ベクトル t の次元は潜在変数の数に対応する。式(4)は入力変数 x から出力変数を直接表した式となっており，重回帰モデルと同等である。つまり PLS モデルは重回帰モデルの形式に変換し，重回帰係数を得ることができることになる。これにより，多くの入力変数があって直接重回帰モデルを構築するのが困難な場合でも，PLS モデルをいったん構築した上でこれから上述のようにして重回帰係数を得ることができる。

(3)　PLS モデルを適用した品質シミュレーション

入力（プロセス）変数 x の変化に対して出力（品質）変数 y がどのように変化するかを PLS モデルでシミュレーションする機能を開発した。従来の重回帰モデルでは入力変数同士に互いに相関がある場合に，入力変数間の相関を考慮しないで設定すると，現実にはあり得ないような入力変数の組み合わせになってしまうことになる。

そこで，相関のある入力変数を集約した変数である潜在変数 t をユーザが設定し，これに対する PLS モデルから入力変数の推定値 $\hat{x}$ と出力変数の推定値 $\hat{y}$ を算出することで，入力変数同士の相関を保ったままシミュレーションを行えるようにした。**図 2** に Windows〈注〉上で動作するパッケージとして開発した品質シミュレーションの画面例を示す。製造条件を変更した場合に品質がどのように変化するのかを，製造プロセスの物理的知見と照らし合わせながら，ユーザ自身が自由に容易にシミュレーションできるようになった。

〈注〉Windows：米国 Microsoft Corp. の商標または登録商標

図 2　品質シミュレーション機能の画面例

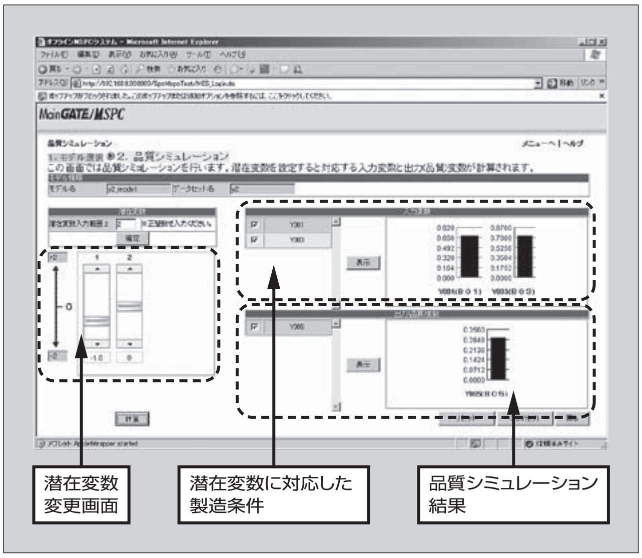
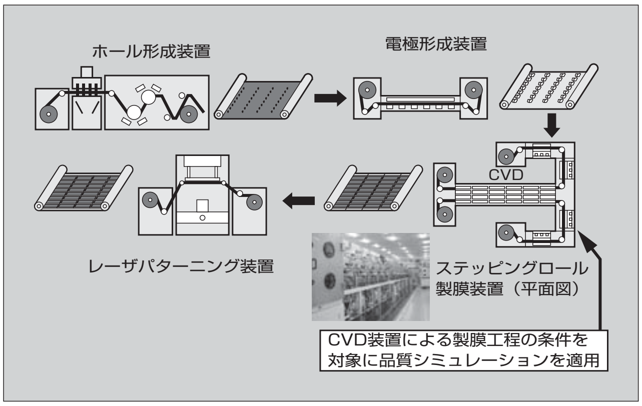


図 3　薄膜太陽電池の製造工程



2. 4　太陽電池製膜工程の品質シミュレーション事例

ここでは**図 3** に示す富士電機の薄膜太陽電池の製膜工程において，製造条件パラメータと製品品質の関係を PLS によりモデル化し，品質シミュレーションにより製品品質を高めるために，製造条件パラメータをいかに変えるかを求めた事例について述べる。

製膜工程における製造条件として，温度，圧力，製膜時間，製膜速度，膜厚，ドープ量など，約 10 種類のパラメータがあり，この工程全体で 100 パラメータ程度になる。これらのパラメータは互いに相関を持っており，製造条件の変更は相関を保ちつつ行う必要がある。製品品質はセルの変換効率で評価する。

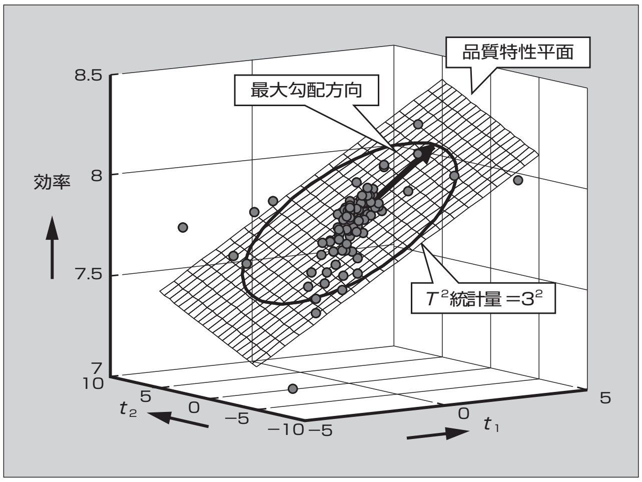
この約 100 種類の条件パラメータのうち，品質に与える影響が強い 30 種類についてパラメータ間の相関を考慮しつつ少しずつ条件値を変えて製造実験を行った。115 サンプルのデータを用いて，30 種類の条件パラメータのそれぞれを入力変数とし，効率値を出力変数とする PLS モデルを作成した。

図 4 は主要な二つの潜在変数に対する効率値の分布を表すものである。図中の平面（品質特性平面）が PLS モデルを表しており，これにより点で表された実データの分布が近似されている。

ここでは効率が高いほうが望ましく，この平面の最も勾配のきつい方向（最大勾配方向）へパラメータを変化させることにより，効率を高められる可能性がある。これが潜在変数空間において変化させるべき“推奨方向”となる。

この場合，推奨方向は二つの潜在変数（t_1，t_2）の変化方向として表されるが，さらに潜在変数の空間（ここでは t_1-t_2 平面）上で“正常”と判断される範囲として，T^2 統計量が 3^2（標準偏差の 3 倍に相当）の円内に限ることにより現実的に妥当な範囲内で条件を定めることができる。また，これを元の条件パラメータの変化方向に変換することができる。このとき元の条件パラメータ間の相関が保たれたままの変化なので，現実的に無理のない変化方向となる。

図 4　品質シミュレーションの例



最良の製造条件を求める際に，PLS モデルを用いない場合は，例えば 30 個のパラメータを 3 水準ずつ変化させるとしても 3^{30} 通りの実験が必要となり，現実的には実施が不可能である。試行錯誤で，あるいは経験的に実験点を決めていくことになる。これに対して，PLS モデルを用いる場合では，品質特性平面上を探索して最適条件を求めるため，効率的に実験点を決めることができる。

3　モデル予測制御（MPC）の取組み

MPC は，PID 制御では満足な制御性能を実現しがたい干渉のある多変数系や，ムダ時間の長い制御対象に対して有効な制御アルゴリズムである。これまで，石油化学プラントや，鉄鋼プロセス，空調などプロセス制御分野を中心に多くの適用がなされてきた。富士電機では凝集プロセス，ゴム重合プラント，エネルギープラントなどへの適用を進めてきた。今後，より多くの分野で活用していくために，制御性能の面からは，外乱オブザーバを応用して外乱抑制性能を大幅に強化している。また，システムの面からは，他社に先駆けて汎用 PLC に MPC のリアルタイム計算部（MPC 実行エンジン）を搭載してきた。

3.1　外乱オブザーバ

MPC は将来にわたる予測を行いながら，制約条件や目標軌道への収束が考慮できるため，PID などに比べて非常に高い精度の制御が可能である。しかし，一方で計測値に含まれない未知の外乱や非線形性などに起因するモデル化誤差が生じた場合，予測が外れ，その結果制御性能が低下する。特にステップ応答モデルに基づく MPC は，ランプ状の外乱発生時における大幅な性能低下が指摘されている。[7]ランプ外乱に特に弱い理由は MPC の予測誤差修正方法に起因しており，本質的な課題である。

この課題に対処するため，従来大きく分けて三つのアプローチがとられてきた。すなわちモデル自体を非線形モデルや状態空間モデルに変更する方法（A 案[7,8]），外乱応答特性をモデルに含める方法（B 案[8]），ロバスト制御の考え方を取り入れる方法（C 案[8]）である。これらのアプローチの長短を**表 1** に示す。いずれの方法においても，モデル化誤差と未知外乱に同時に対処することは難しかったり，計算負荷が増大したりするなどのデメリットがある。

富士電機では MPC の外乱特性を向上させるために，電動機制御などでも実績のある外乱オブザーバ[9]のアイデアを取り入れた方法を考案した。**図 5** に開発した外乱オブザーバ付き MPC のブロック線図と動作説明を示す。

表 1　手法比較

	A 案	B 案	C 案	評価内容
モデル化誤差	△	×	○	モデル化誤差に対応可能かどうか
未知外乱	×	△	△	未知外乱に対応可能かどうか
計算時間	△	○	×	計算時間が速いかどうか

ブロック線図上の計算に基づき，外乱オブザーバ導入前と導入後の，未知外乱 d による予測誤差の抑制効果を比較すると，

$$\|(I+P_n(j\omega)L)^{-1}P_n(j\omega)\| \le \gamma \|P_n(j\omega)\| \quad \cdots\cdots(5)$$

となる。[10,11]

I：単位行列

$P_n(s)$：ノミナルプラントモデル

L：オブザーバゲイン

γ：外乱抑制効果の指標

ランプ外乱の伝達関数（$1/s^2$）はゼロ周波数で無限大のゲインを持ち高周波数でゼロに減衰する。このような外乱を抑え込むにはゼロ周波数付近での成立条件を考えればよい。

$$\|(I+P_n(0)L)^{-1}P_n(0)\| \le \gamma \|P_n(0)\| \quad \cdots\cdots(6)$$

不等式(6)の解 L は $P_n(0)$ の特異値分解により γ の陽な関数形として求めることができる。[10,11]

ところで，最終値の定理により，

$$\lim_{t\to\infty}(P_n * U_i)(t) = \lim_{s\to 0} s(P_n(s)U_i(s)) = \lim_{s\to 0} s\left(P_n(s)\frac{1}{s}e_i\right) = P_n(0)e_i \quad \cdots\cdots(7)$$

が成り立つ。

e_i：第 i 番目の単位ベクトル

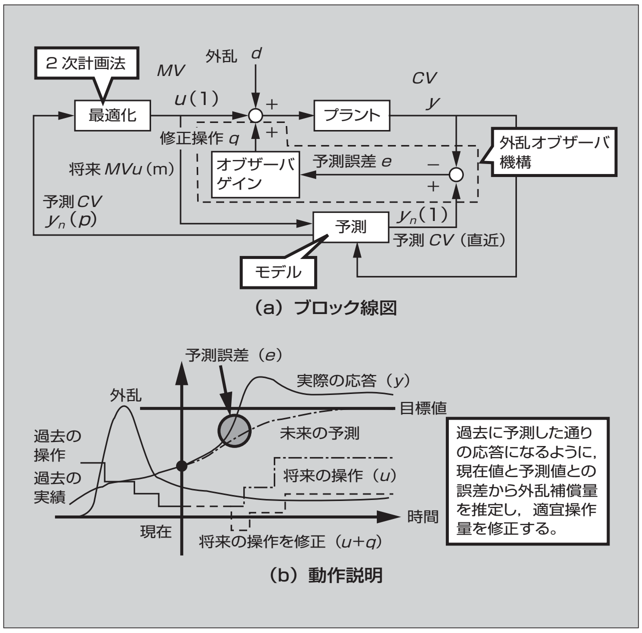
$U_i(s)$：第 i 番目要素のみからなるステップ関数

$P_n(0)$：プラントのステップ応答の収束値を各操作端に対して集めた行列

このため本手法はステップ応答に基づく MPC に適用することができる。

図 6 にプロセス制御分野におけるベンチマーク問題である Wood-Berry モデル[12]にランプ外乱を加えた場合の MPC

図 5　外乱オブザーバ付き MPC



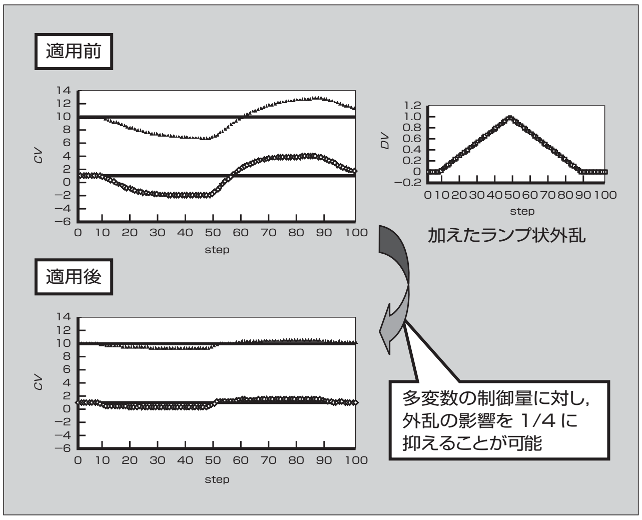
による定常状態維持特性を比較したシミュレーション結果を示す。外乱オブザーバを適用することにより，外乱による内部変数 *CV* の変動幅を 1/4 以下に抑えることが可能である。

なお，操作端におけるゲインの変動は入力外乱と等価とみなせる。例えば，操作量と同じ外乱が加わるとゲインが 2 倍になったことと同じである。本手法は入力外乱から予測誤差への感度を低減するため，この種の操作端ゲインに対するモデル化誤差を吸収することもできる。また，本手法はオブザーバの計算のみで実現できるため計算負荷は少ない。したがって，**表 1** の三つの手法との比較でも，モデル化誤差，未知外乱，計算速度の 3 点で優位性がある。

また，モデル予測制御の MV 制約を補償するためのゲイン調整方法も検討を完了している。[10,11]

本技術の適用により，長期連続運転などの高い安定性が求められるプラントに対して外乱に強い MPC 機能が提供できる。

図 6　外乱オブザーバの適用シミュレーション

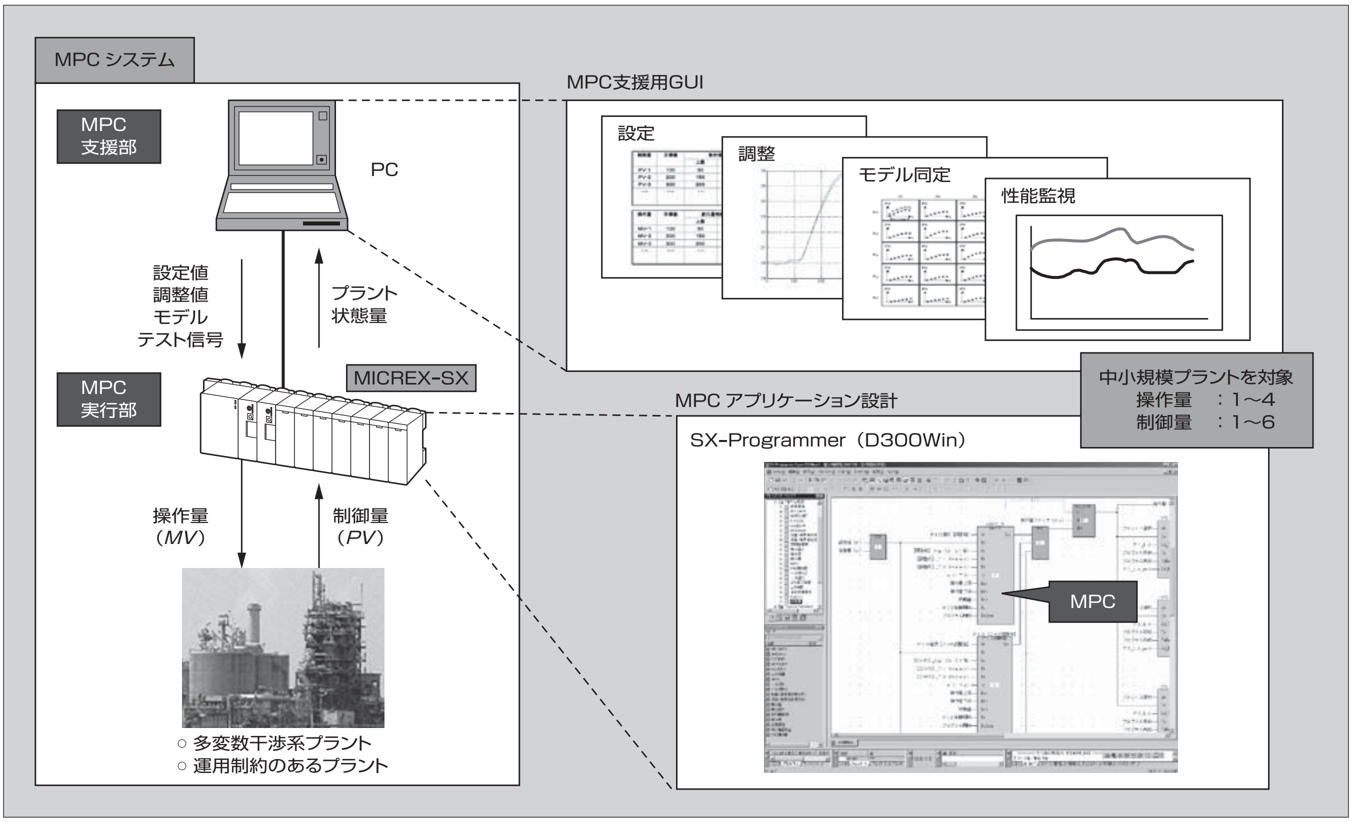


3. 2　汎用 PLC を用いた MPC システム

MPC は，これまで石油化学プラントや鉄鋼プロセスなど，取り扱う制御変数が 100 個を超えるような比較的大規模なプロセスに対して数多くの適用が図られ，効果を挙げてきた。一方，制御変数が小規模なプロセスや機器の場合でも，MPC によりこれらの変数を同時に制御することで，安定運転や制御性能の向上が図れるなどの効果が十分に見込めることも少なくない。しかし，信頼性，導入費用などさまざまな制約から，MPC の導入は限られたプロセスにとどまっていた。これに対して，富士電機では，入出力規模があまり大きくない制御対象に対し，ユーザが容易に MPC を活用できるように，汎用 PLC を用いた MPC システムを実現した。

図 7 にこのシステム構成を示す。本システムでは，MPC 実行エンジンを PLC に，また MPC のチューニングや内部モデルの同定機能などの支援ツールを PC に置くシステム構成としている。次に開発したシステムの特長を述べる。

図 7　「MICREX-SX」を用いた MPC システム構成



特集

⑴　PLC で高信頼性を実現

MPC モジュールは，MPC 実行エンジンを富士電機製 PLC である MICREX-SX 上の組込みアプリケーションとして構築したものである。そのため PLC が持つ機器としての信頼性も享受できる。高い信頼性が必要な制御対象には，二重化システム上に MPC モジュールを実装することや，耐環境対策型 CPU を用いることも可能である。

なお，通常は同一のベースボード上で MPC モジュールとほかの制御ソフトを実行させるモジュールが動作する構成（マルチ CPU 構成）としている。MPC モジュール単独でのシステム構築も可能であり，例えば既設設備へのアドオンシステムとして導入できる。

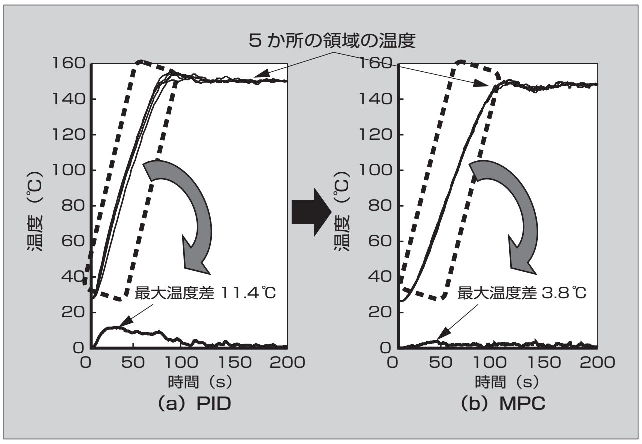
⑵　制約付きの MPC を高速で実現

MPC 制御則は，PC 用ソフトで実用化されているものと同等の機能を実装しており，例えば，制御量，操作量の制約も直接組み込んでいる。また，前述したように MPC 実行エンジンを単独の CPU で演算するため，ほかのアプリケーションの実行に影響を与えることがない。4 入力（操作量），6 出力（制御量）規模の MPC で最短 5 秒の制御周期で実行可能である。

⑶　利便性，保守性の向上

MPC をシステムに組み込む際には，MPC の動作条件，移行条件，移行の際の安定化処理や制御量のフィルタリングなどの入出力処理，異常処理といった MPC 周辺の機能を組み込む必要がある。従来は，これらのエンジニアリングを PC 上の MPC ツールと PLC などの制御システムのおのおので行う必要があった。本システムでは MPC 実行エンジンを MICREX-SX の設計支援ツール「D300Win」のファンクション・ブロック（FB）として提供している。ユーザは，PLC のプラント制御用のプログラムと同じツール上で同一のソフトウェアとして，前述の周辺処理を含む MPC アプリケーションを一元的に構築・管理できる。MPC に精通したユーザにとっては，まさに PID 感覚で MPC を活用することができる。MPC モジュールは PLC が収納される制御盤に組み込むので，設置効率の点でもユーザに不便を強いることはない。

図 8　ガラス基板同期昇温への MPC の適用結果



3.3　適用事例

MPC を FPD（Flat Panel Display）製造の基本単位となるガラス基板の熱処理プロセスに適用した事例をここでは紹介する。製造工程においてガラス基板にはアニールなどの熱処理が必要になる。クラック防止や，表示ムラを防ぐために，昇温時も処理対象面全体を均一温度に制御しなければならない（同期昇温）。このプロセスに対して，従来はガラス基板を多数の領域に分割し，おのおのの領域に対して，温度やヒータへの制御量などを入出力とする PID 制御を用いて多点に対する同期昇温を行っていた。これに対し，MPC を用いて同期昇温を行う方法で，最も温度の高い領域と最も温度の低い領域との温度差（最大温度差）が小さくなるかについて，検証を行った。**図 8** は PID と MPC を用いた場合の最大温度差を比較した結果であり，MPC を用いることにより，昇温過程での最大温度差を PID 制御の 11.4℃から 3.8℃に著しく低減させることができた。

4　あとがき

オートメーションの高度化に役立つ制御技術として MSPC と MPC を取り上げ，MSPC では薄膜太陽電池の高効率化を図るための品質シミュレーション技術について述べた。また，MPC では富士電機独自の外乱オブザーバ機能ならびに MPC 機能の PLC への実装とその適用例について紹介した。

MSPC については開発したエンジンを各種パッケージに組み込み，産業分野を中心に適用を広げていく予定である。また，MPC については，大規模な石油化学，鉄鋼などのエネルギープラントの制御システムのみならず，中小制御システムへも積極的に活用していく所存である。

参考文献

⑴　黒谷憲一, 伊藤修. AI・アドバンスト制御の技術動向と富士電機の取組み. 富士時報. 1998, vol.71, no.3, p.149-152.

⑵　加納学ほか. プロセスケモメトリクスによる統計的プロセス管理, システム/制御/情報. 2004, vol.48, no.5, p.165-170.

⑶　Jacques Richalet. WHY PREDICTIVE CONTROL. 計測と制御. 2004, vol.43, no.9, p.654-664.

⑷　J. M. Maciejowski. 足立修一ほか訳. モデル予測制御－制約の下での最適制御－. 東京電機大学出版局.

⑸　菅野智司ほか. オンラインSPC機能とMSPC機能による監視・分析支援環境の構築. 第53回システム制御情報学会研究発表講演会. 2009.

⑹　鈴木亮平ほか. モデル予測制御実装に関する計算性能についての評価. 平成21年電気学会全国大会. 2009-3, no.4-179, p.302-303.

⑺　P. Lundstrom. et al. Liminations of Dynamic Matrix Control. Computers chem. Engng. 1995, vol.19, p.409-421.

⑻　S. J. Qin, T. A. Badgwell. A Survey of Industrial Model

Predictive Control Technology. Control Engineering Practice. 2003, vol.11, no.7, p.733-764.

(9) 西田英幸ほか. 産業用電動力応用プラントの制御技術. 富士時報. 1997, vol.70, no.10, p.522-527.

(10) 丹下吉雄ほか. 多変数外乱オブザーバーを用いたモデル予測制御. 第9回計測自動制御学会制御部門大会. 2009.

(11) Tange, Y. et al. A Multi-variable Disturbance Observer for Model Predictive Control. Proc. 17th Mediterranean Conference on Control & Automation. Thessaloniki. Greece. 2009, p.856-861.

(12) R. K. Wood, M. W. Berry. Terminal Composition Control of a Binary Distillation Column. Chemical Engineering Science. 1973, vol.28, p.1707-1717.

勝野　　徹

電力・エネルギー分野の解析・制御アルゴリズム開発業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部制御技術センター環境・安全制御開発部長。電気学会会員，日本シミュレーション学会会員。

松本　宏治

産業プラント制御システムの企画・設計業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社ドライブ事業本部産業・社会ソリューション統括部共通技術部課長補佐。計測自動制御学会会員。

松井　哲郎

各種産業システムへの最適化，予測，診断技術の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社情報通信制御開発センターフィールドソリューション部課長。電気学会会員。

安全・安心に貢献する放射線管理用機器・システム

Radiation Monitoring Instruments and Systems that Contribute to Safety and Security

藤本　敏明 Toshiaki Fujimoto　　石倉　剛 Takeshi Ishikura　　伊藤　勝人 Katsuhito Ito

富士電機は放射線の利用とモニタリングに取り組んでいる。モニタリング分野では，新設・増設される原子力発電所や増加する放射線利用職場に対応した個人線量管理システムや，サーベイメータなどを開発し，提供している。個人線量管理システムでは，半導体式の個人線量計で検出した線量を無線でリアルタイムにモニタリングできる線量の状態監視システムや入退室時の体表面モニタを提供している。さらに，放射線取扱い施設周辺の環境放射線をサーベイメータで測定し，データを自治体と共有し公開することで，住民の安全・安心を実現するシステムおよびサーベイメータを提供している。

Fuji Electric is working to develop methods for utilizing and monitoring radioactivity. In the monitoring field, Fuji Electric is developing and providing personal dose monitoring systems, survey meters and the like for use at newly constructed nuclear power plants and at an increasing number of worksites that use radiation. As personal dose monitoring systems, Fuji Electric provides a dose monitoring system capable of wireless real-time monitoring of doses detected with a semiconductor-based personal dosimeter, and a body surface monitor for use when entering or exiting a radiation controlled area. Additionally, using a survey meter to measure the environmental radiation surrounding a radiation handling facility, and then sharing that data with local governments and disclosing it to the public, Fuji Electric also provides systems and survey meters for realizing safety and security for the local population.

1　まえがき

原子力発電は，年間を通して安定した電力が得られ，燃料が再利用可能である。CO_2 発生量も少ないことから低炭素社会のエネルギー供給源として再評価され，原子力発電所の新設・増設の建設計画が立案されている。また，放射線の利用においては，がん治療などの高度医療分野や工業，農業分野で高エネルギー線として利用される分野が拡大している。

富士電機は，原子力の商用発電が始まった1970年代から放射線モニタリングの分野で放射線・原子力の安全にかかわってきた。その間，国内初の警報付個人線量計の開発，計算機を利用した国内初の被ばく管理システムの開発と個人被ばく線量管理の自動化，国内初の表面汚染モニタによる表面汚染測定の自動化や，モニタリングポストなどによる環境放射線モニタリングの効率化など，放射線・原子力利用の安全にかかわる機器・システムの開発と提供を続けてきた。放射線応用機器分野でも放射線の物質透過能力を利用した厚さ計やレベル計などを開発し，鉄鋼，紙パルプ産業の工場ラインの自動化で使われている。放射線透過撮像検査が非破壊検査として最近利用され始め，貨物検査による輸配送の安全，飲食品や医薬品の異物検査による食・薬の安全，保守点検時の配管検査などによる施設の安全など，オートメーション事業として推進する安全と安心のシステムでの利用も始まっている。

本稿では，放射線・原子力の安全な利用，特に大きな比重を占める放射線取扱い施設を中心に放射線管理用機器・システムについて，最近の富士電機の状況を述べる。

2　放射線・原子力利用における安全の課題

電力供給にかかわる世界の原子炉の基数は2009年4月現在，稼動中が432基，建設中が52基，計画中が66基と増加傾向にある[(1)]。国際原子力機関（IAEA）の2008年9月の報告書でも原子力発電所の設備容量は，2007年に対して2030年には約30～100%増加し，特に東アジア，東欧，中東・南アジアでの新設の伸びが大きいと予測している[(2)]。

内閣府の原子力委員会の「地球温暖化対策に貢献する原子力の革新的な技術開発のロードマップ」（2008年7月）では，主に次の5点の原子力発電にかかわる技術を挙げている。

(a) 耐震安全確保
(b) 原子炉の高経年化の対応
(c) 原子力発電所の稼動率向上に向けた新検査制度改善
(d) 原子力の国際協力の推進
(e) 燃料サイクルや高速増殖炉推進

放射線防護（放射線安全）では，広島・長崎での被ばく生存者の実証的な疫学データの検討を元にした国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告を受け，IAEAなどが中心になり具体的安全基準をまとめて安全体制の規範を国際的に提供する。現在，ICRPの基本勧告の改訂（2007年）を受けた各基準の見直しが進んでいる[(3)(4)]。

日本でも「放射線障害防止法」などでICRPの勧告にさかのぼって安全基準の法令整備をしている。放射性物質の輸送などの国際間にかかわる安全基準は，IAEA基準を採用し，国際的整合性を担保している。放射線障害に関する技術基準は，放射線障害防止の技術的基準に関する法律に基づき文部科学省の放射線審議会に諮問され，審議される。

したがって，放射線モニタリングでは，これら安全基準が確認できる機器・システム開発を主に進めることとなる。

富士電機は，上記情勢と国の政策方針を背景に次に示す項目などの開発を進める。

(a)　速報性（異常時の警報発報）があり，被ばく線量の管理のレベルをさらに上げる機器・システムの開発
(b)　中性子や高エネルギー線利用など新放射線利用分野（医療，工業など）に対応した検出器開発
(c)　海外の原子力施設などに向け，海外規格に対応した機器・システムの開発
(d)　ICRP の勧告にある航空・宇宙や鉱石での被ばくなど自然起源の低被ばく管理に向けた検出技術開発
(e)　放射線防護の観点からクリアランスレベルを判定するための検出器やモニタの開発
(f)　燃料サイクルや高速増殖炉など新プロセスに対応した検出器およびシステムの提供
(g)　放射線を用いた検査装置，配管減肉検出装置の開発

以降では，上記(a)〜(c)項の放射線防護（放射線安全）にかかわる機器・システムを紹介する。

3　最新の個人線量管理システム

放射線・原子力を利用する放射線障害防止法適用事業所は，該当放射線業務を実施する区域を放射線管理区域とし，入退域する放射線業務従事者の線量の管理を義務付けられている。また，放射線業務従事者の被ばく量とその履歴は，財団法人放射線影響協会内の放射線業務従事者中央登録センタで一元的に管理されている。

図1に個人線量管理システムの例を示す。

管理区域入口のゲートで入域する人は，入域許可の有無と許可者本人であるかの確認が実施され，貸与した線量計と入域者との対応をとったのち入域が許可される。退域時は，個人線量計で測定した管理区域内の被ばく線量が管理用計算機に読み込まれ，入域者個人の被ばく履歴に記録される。

退域時に，従事者や持ち出し物品の表面に放射性物質による汚染がないことを体表面モニタなどで確認し，区域外への放射能汚染拡大が防止される。体表面モニタの測定データも同様に管理用計算機に送られ，記録される。一方，管理用計算機は放射線管理区域から送られる入退域時の測定データや作業環境の測定データから，法律に基づく報告書や放射線管理区域の管理に用いる資料を自動作成することで，個人線量管理が運営される。

入退域ゲートで一度に出入りする人が100人以上になることがあるため，入退域時の処理が長引くと大混雑になる。一方で法律による検査であるので測定値は正確さが要求される。検出器の精度向上により検査精度を維持しつつ，処理時間を短縮した線量管理システムを提供している。

瞬停などの事故時でも測定データを保持するために，データの消滅防止や伝送の二重化など最新の安全対策を施している。人との接点であり使いやすさがシステムに求められるため，エンドユーザコンピューティング機能も提供している。

3.1　個人線量計

個人線量計は，放射線業務従事者の外部被ばく線量のモニタリング機器として，胸ポケットに携帯する。被ばく線量がリアルタイムに表示されるのでいつでも確認できる。管理値以上の被ばく時には警報を発して退避を促すため，計画外の被ばくからの安全が確保される。

個人線量計は γ 線，β 線，高速中性子，熱中性子用の4種類のセンサにより放射線を測定する。センサは，シリコン（Si）ウェーハ上にアモルファス Si を成膜して pn 接合を形成し，空乏層で放射線を検出する構造になっている。γ 線は空乏層内で発生した電子で検出し，β 線は入射窓を薄くして直接検出する。高速中性子は**図2**のようにセンサ上部のポリエチレンで発生した反跳陽子で検出し，熱中性子はセンサ上部のボロン膜で発生した α 線で検出する。

核燃料の再処理施設や加速器施設では中性子線量の計測が重要で，新たに中性子個人線量計を開発した。

IEC 規格（IEC 61526）では，100 keV から 4.5 MeV のエネルギー範囲の中性子線に対し，線量計のエネルギー依存性が従来の −50 〜 +150% を ±50% に改善することが求められる。中性子線は高エネルギー成分を高速中性子線センサで，低エネルギー成分を熱中性子センサで測定し，合算して測定している。各センサのエネルギーレスポンスに基づき，中性子吸収フィルタと以下に示す新しい演算処理方法を開発して，エネルギー依存性を IEC 規格に対応した。

$$H_{\mathrm{p}}(10) = H_{\mathrm{fast}} + H_{\mathrm{slow}} = aC_{\mathrm{fast}} + bC_{\mathrm{slow}} \quad \cdots\cdots (1)$$

図1　個人線量管理システム

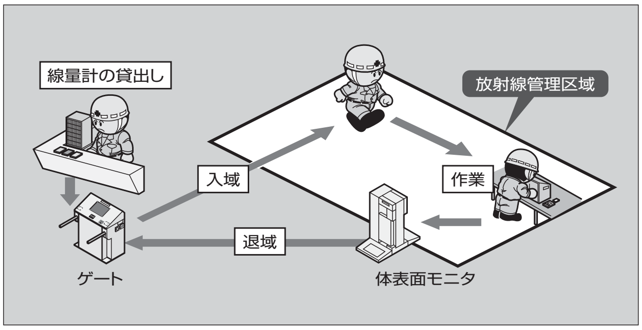
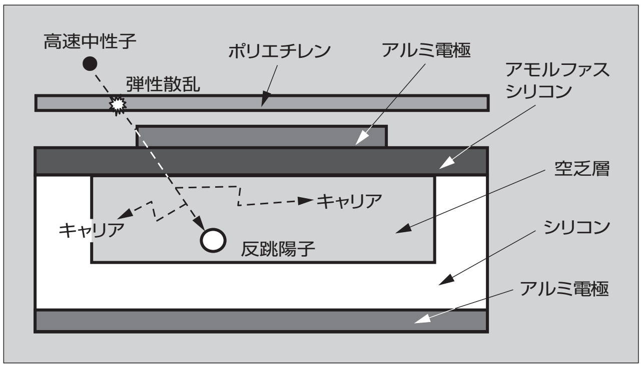


図2　高速中性子センサの構造



$$C_{\text{fast}} = C_{\text{fast1}} - cC_{\text{fast2}} \quad \cdots\cdots(2)$$

$$C_{\text{slow}} = C_{\text{slow1}} - dC_{\text{slow2}} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$a = \frac{\int_{1\text{MeV}} h_{\text{p}}(10,\ E)\phi(E)\text{d}E}{\int_{1\text{Mev}} R_{\text{fast}}(E)\phi(E)\text{d}E} \quad \cdots\cdots(4)$$

$$b = \frac{\int_{\text{thermal}}^{1\text{Mev}} h_{\text{p}}(10,\ E)\phi(E)\text{d}E}{\int_{\text{thermal}}^{1\text{Mev}} R_{\text{slow}}(E)\phi(E)\text{d}E} \quad \cdots\cdots(5)$$

H：中性子線量
E：中性子エネルギー
$H_{\text{p}}(10)$：個人線量当量
$\phi(E)$：中性子フルエンス
$R(E)$：エネルギーレスポンス
$h_{\text{p}}(10,\ E)$：ICRP 74 のフルエンスの個人線量換算係数
C_1：ディスクリミネータ 1 のカウント数
C_2：ディスクリミネータ 2 のカウント数
c：高速中性子センサのレスポンス補正係数
d：熱中性子センサのレスポンス補正数

添え字の fast は高速中性子センサ，slow は熱（thermal）中性子センサであることを示す。

図 3　中性子に対するエネルギー依存性

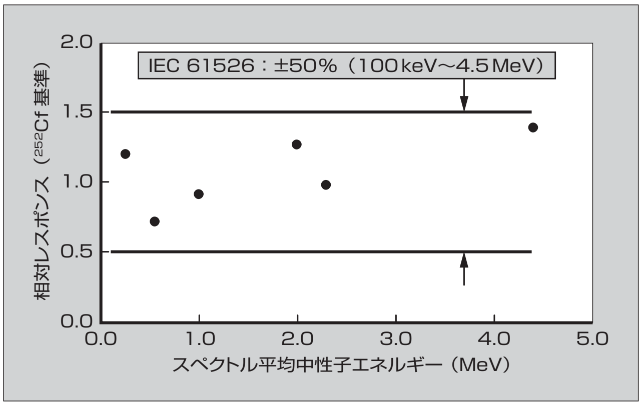


図 4　個人線量計の外観

この結果，**図 3** に示すように，100 keV 〜 4.5 MeV の中性子エネルギー範囲でエネルギー依存性（相対レスポンス）を IEC 規格の満足する－49 〜＋41％とした。(5)(6)

この中性子センサを用いて製品化した個人線量計の外観を**図 4** に，中性子計測性能を**表 1** に示す。また，低消費電流化を図り，電池寿命を 3,000 時間（従来比 2 倍）と長寿命化した。

3. 2　個人線量の無線モニタリングシステム

従来の個人線量管理システムは，従事者の被ばく情報を管理区域からの退域時に確認・記録するもので，退域時点のみの被ばく管理になっていた。近年，作業時の被ばく管理レベルを向上させるために，作業中もリアルタイムで被ばく情報を連続監視する要求が出てきた。このため，無線モニタリングシステムを開発し，個人被ばくの状態監視による被ばく低減と作業管理の円滑な運用を可能にした。

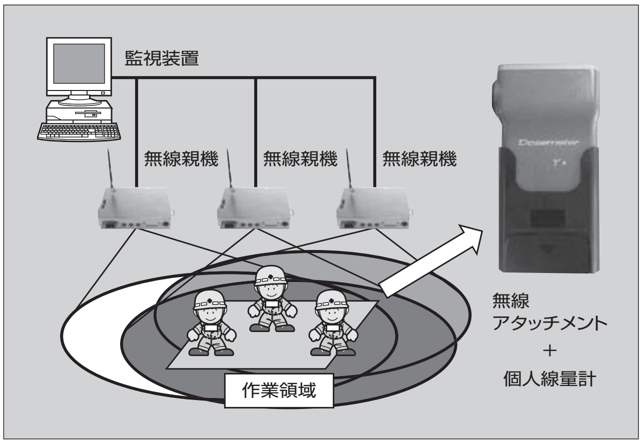
無線モニタリングシステムは**図 5** に示すように，個人線量計，個人線量計に接続する無線アタッチメント（無線子機），複数の無線親機，監視装置から構成される。

被ばく情報を，短時間（1 分程度）の周期で不特定数の無線子機の全数から効率的に収集するには，無線親機の要求で複数の無線子機が同時に応答し，電波の衝突による受信不能の発生を抑制する必要がある。このため，複数のチャネル（通信周波数）と複数の受信タイミング（スロット）を無線親機側に設定した。無線子機は設定されるすべての周波数とスロットの組合せから任意の設定を選択して通信することで他の無線子機との衝突を減らす方式にしている。(7) また，作業域で設備などに遮られ電波が届かない場

表 1　個人線量計の中性子計測性能

測定線種	中性子
エネルギー範囲	0.025 eV 〜 15 MeV
エネルギー依存性	±50％（100 keV 〜 4.5 MeV）
方向特性	±30％（上下左右 60°，^{241}Am-Be）
指示誤差	±15％（0.5 mSv 以上）
線量率特性	±20％（0.5 mSv/h 以上）

図 5　個人線量の無線モニタリングシステム



所をなくすために，無線親機は複数台で作業域をカバーする配置としている。

無線親機 2 台，無線アタッチメント 25 台での実際の業務環境を想定した構成によるランニング試験の通信成功率は，100% 近い結果であった。

現在，無線規格は日本規格（無線周波数 429.5 MHz）または米国規格〔FCC（Federal Communications Commission）PART15：無線周波数 915 MHz〕に対応可能である。

3. 3　体表面モニタ

体表面モニタは放射線管理区域境界に設置され，区域外への放射能汚染を防ぐために厳格な出入管理用に使用される。富士電機はこれまで測定対象の形状や α 線・β 線などの放射線種に応じて，さまざまな形状のプラスチックシンチレーション検出器を開発し，それらを組合せニーズに適合した表面汚染モニタを提供してきた[8]。今回，人体表面の測定部位を拡大し，かつ高感度で自動測定する新型体表面モニタ（ポータルモニタ）を開発した。

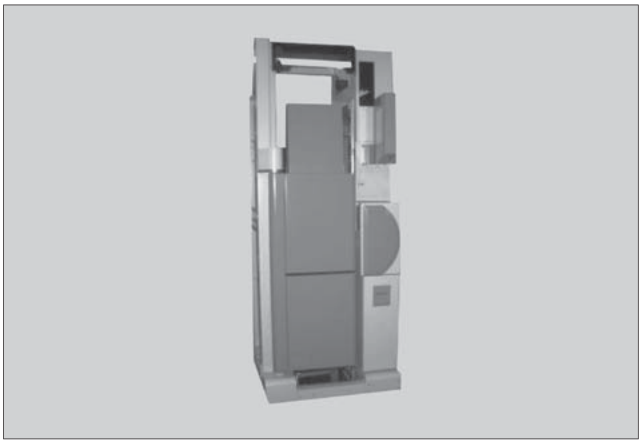


図 6　体表面モニタ（全身同時測定型）

図 7　体表面モニタ（前面，背面の２回測定型）

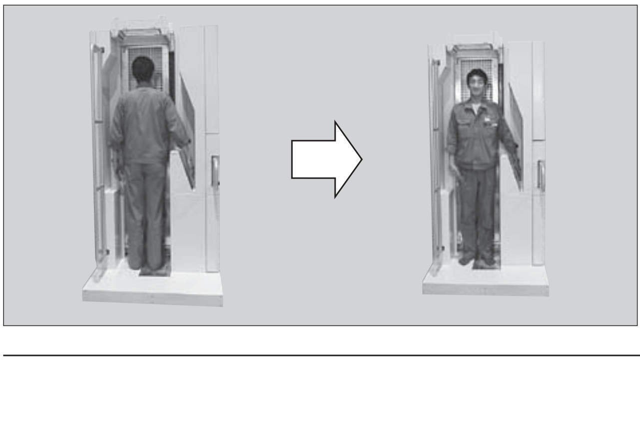


図 8　測定中の体表面モニタ（前面，背面の２回測定型）

国内では**図 6** に示すように体の 15 部位以上を一回で測定し，退域処理時間が短縮できるタイプが主流である。一方，海外では**図 7** で示すように，体の前面・背面の 2 回に分けての測定となるが，設備費を安価にできるタイプが主流になっている。測定状態を**図 8** に示す。

モニタの正面には 310×200（mm）の有感部をもつプラスチックシンチレーション検出器を 8 個上下に配置した。検出器からの計数信号は信号処理部に入力され，それぞれ上下に隣り合った検出器の計数信号を合算処理することにより，各検出器間の境目の不感部分をなくした。検出器間の境目の検出効率は約 25% とし，垂直分布性能を飛躍的に向上させた。正面検出器の検出感度は**表 2** のとおりで，基準値（4 Bq/cm^2）を十分に達成する性能を実現した。**表 2** の検出感度は(6)式，(7)式による。

$$Y = \frac{M_1}{W_s\,\varepsilon_s} \qquad \cdots\cdots(6)$$

$$M_1 = \frac{0.05B + 3\sqrt{\dfrac{B}{t} + \dfrac{B}{T}}}{\varepsilon_a} \qquad \cdots\cdots(7)^{*1}$$

＊ 1：JIS，IEC 規格準拠[9][10]

Y ：検出感度（Bq/cm^2）
M_1：最小検出表面放出率（s^{-1}）
W_s：線源面積（cm^2）（$W_s = 100$）
ε_s：線源効率（$\varepsilon_s = 0.5$）
B ：BG 計数率（s^{-1}）
t ：BG 測定時間（s）（$t = 200$）
T ：測定時間（s）（$T = 10$）
ε_a：機器効率

算出条件
(a)　線源～検出器保護膜距離：5 cm
(b)　BG 線量率：0.25 μSv/h（^{60}Co 照射）
(c)　使用線源：10×10（cm）β 線用面線源（^{60}Co，^{36}Cl，^{90}Sr）

3. 4　半導体式ハンドフットモニタ

容易に測定したい場所に移設可能で，手と足の汚染のみを測定する簡易化した半導体式ハンドフットモニタを開発した。従来のハンドフットモニタの GM 計数管方式より長寿命かつメンテナンスフリーで，またプラスチックシン

表 2　正面検出器の検出感度

対象核種	^{60}Co	^{36}Cl	^{90}Sr
検出感度（Bq/cm^2）	約 0.7	約 0.5	約 0.4

図 9　半導体式ハンドフットモニタ

表 3　半導体式ハンドフットモニタの効率と感度

検出器	機器効率	検出感度
手用検出器	31％	0.14 Bq/cm^2
足用検出器	17％	0.19 Bq/cm^2

チレーション検出器方式より軽量（従来比 1/2 の質量）かつ小型化した。また，外部出力端子から管理用計算機と接続可能である。外形を**図 9** に，JIS 規格に準拠した機器効率と検出感度を**表 3** に示す。(9)

表 3 の検出感度の算出は前出の式(6)による。ただし，線源面積 Ws は手用が 150 cm^2，足用が 300 cm^2 である。

算出条件

(a)　線源〜検出器保護格子距離：密着

(b)　BG 線量率：0.1 μSv/h

(c)　使用線源：10×10（cm）β 線用面線源（^{36}Cl）

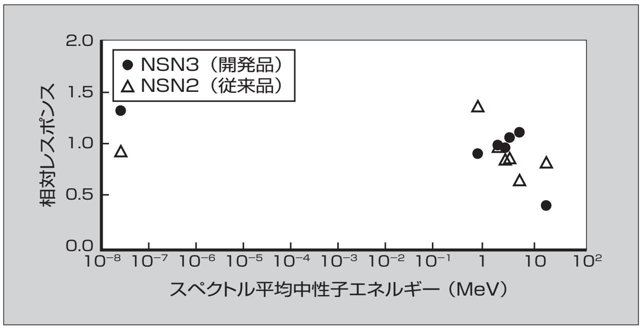
4　環境放射線測定器（サーベイメータ）の高度化技術

原子力発電所などの放射線取扱い施設では，施設内および周辺の環境放射線量の管理が法令で義務付けられ，放射能汚染などからの安全を環境放射線モニタリングで確認している。また，原子力発電所周辺の値を地方自治体と共有し，地元に公開することで施設周辺の住民の安全・安心を醸成している。

富士電機は，測定器や伝送の 2 重化による測定データの信頼性向上，データ処理などの自動化を進める機器やシステムの提供と開発を実施している。

また，日常使用する簡便な放射線測定器として持ち運び可能なポータブル放射線モニタが，原子力施設や放射線治療などで高エネルギー線利用が増加している医療施設などで必要とされ，広く使用されている。オートメーション事業として進める安全・安心のシステムでの放射線利用や放射線利用施設での環境放射線モニタリングの簡便なシステム構成時の検出（測定）器として，需要が増えると予想される。

図 10　開発品と従来品における中性子に対するエネルギーの依存性の比較



このため操作性を向上させた最新の環境放射線測定器（サーベイメータ）を開発したので紹介する。

4.1　中性子サーベイメータ

原子力施設や加速器などで使用される中性子サーベイメータは，測定のため高速中性子を減速させる減速材が必要で，質量が 7 〜 10 kg と重かった。このため，測定や運搬での作業者の負担が大きく，軽量化が求められてきた。従来品は，減速材（ポリエチレン）で覆われた中性子検出器（^{3}He ガス内封）から得られる計数を，線量に換算していた。開発品は，新しいガスの検出器からの弾性散乱反応および（n，p）反応による波高情報を中性子エネルギー情報に変換して，G 関数によりパルスごとに線量の重み付けを行い，線量に換算するようにした。

$$H=\int h(E)\,\phi(E)\,\mathrm{d}E=\int P(L)G(L)\,\mathrm{d}L \quad \cdots\cdots(8)$$

$$h(E)=\int R(E,\ L)G(L)\,\mathrm{d}L \quad \cdots\cdots(9)$$

$$P(L)=\int R(E,\ L)\,\phi(E)\,\mathrm{d}E \quad \cdots\cdots(10)$$

H：中性子線量
E：中性子エネルギー
$h(E)$：線量換算定数
$\phi(E)$：中性子フルエンス
L：パルス波高
$P(L)$：中性子波高分布
$G(L)$：G 関数
$R(E,\ L)$：中性子センサのレスポンス

G 関数の重み付けを工夫することで，約 4 kg あるポリエチレンをなくしても，ポリエチレンによる中性子減速効果と同等の効果を得た。(11)

これにより，**図10** に示す従来品と同等の性能で，質量が 2 kg で従来比約 1/4 の中性子サーベイメータ（**図11**）を製品化した。(12)(13)

4.2　ワイドエネルギーレンジサーベイメータ

X 線装置などからの低エネルギーの放射線を測定するため専用測定器が使用されていたが，医療の分野では低エネ

図 11　中性子サーベイメータ外観

図 13　ワイドエネルギーレンジサーベイメータ外観

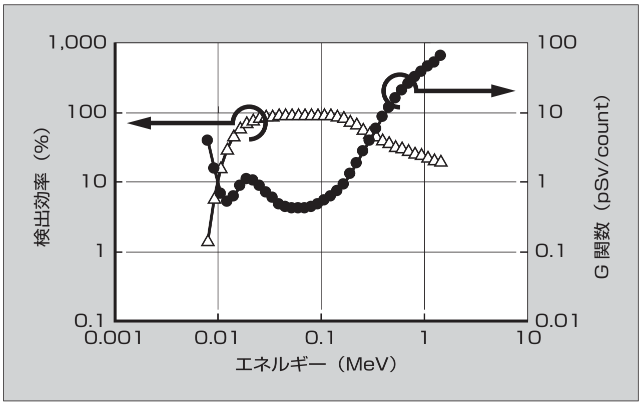


図 12　検出効率と G 関数

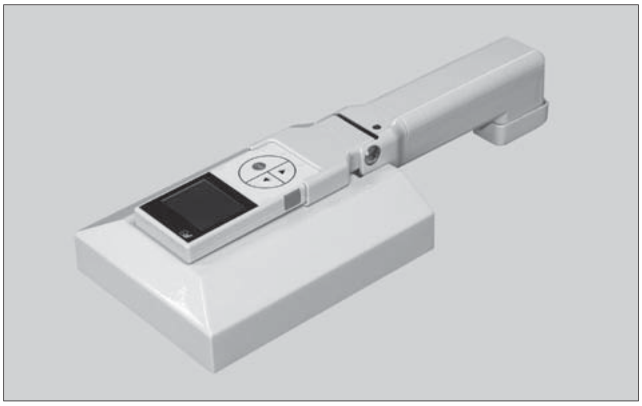


図 14　半導体汚染サーベイメータ外観

ルギーから高エネルギーまで 1 台で測定可能な測定器の要求が高まってきた。

NaI（Tl）シンチレーション検出器の入射窓を薄膜化して低エネルギー（8 keV）を検出可能とした。また，8 keV ～ 1.5MeV までの広範囲のエネルギーを均一に測定するために，検出器の 8 keV から 1.5 MeV までのエネルギーレスポンスに応じた G 関数を式(8)より計算して設定した。**図12** に計算した G 関数と各エネルギーでの検出効率を示す。

開発した，8 keV の低エネルギー X 線から 1.5 MeV の γ 線まで測定可能な測定器の外観を**図13** に示す。

4. 3　半導体式汚染サーベイメータ

放射性物質の汚染サーベイメータではプラスチックシンチレータが主流である。真空管である光電子増倍管を使用するので小型・軽量化が困難であった。現在，Si 半導体センサを使用し，**図14** に示した外観の小型・軽量化した汚染サーベイメータの開発をしている。前項で紹介した半導体式ハンドフットモニタの検出技術を応用し，α 線と β 線を同時に測定できる製品である。

5　放射線機器校正施設

施設の安全を管理・監視する法令のモニタリングに用いるために，原子力発電所や，放射線を取り扱う施設で使用する放射線測定器には，計測値への高い信頼性と計測器としてのトレーサビリティが要求される。

富士電機は計量法，JIS Z 4511 などに規定される校正体系を展開している。

5. 1　放射線測定器校正装置

富士電機はさまざまな用途に応じた放射線測定器の校正に対応するため，^{37}Cs 4.44 TBq による 400 mSv/h の高線量照射が可能な γ 線校正装置をはじめ，下記に示すように核種・照射強度の異なる 4 式の校正装置を備えた専用の放射線機器校正施設を継続的に維持管理している（**表 4**）。

(a)　γ 線校正装置（高線量校正用）
　主要校正機器：エリアモニタ，サーベイメータ

(b)　γ 線校正装置（中線量校正用）
　主要校正機器：個人線量計，環境線量計

(c)　β 線校正装置
　主要校正機器：個人線量計

(d)　中性子校正装置
　主要校正機器：中性子エリアモニタ，個人線量計
　　　　　　　　中性子サーベイメータ

これらの校正装置は，照射線量基準測定器・実用標準器を用いて，国家標準からのトレーサビリティを確立させ，

表 4　各校正装置の測定範囲

校正装置	線源 核種	線源 強度	測定範囲 (mSv/h)
ガンマ線校正装置（高線量）	^{137}Cs	4.44 TBq	20 ～ 400
		370 GBq	1 ～ 20
		37 GBq	0.2 ～ 2.5
		3.7 GBq	0.02 ～ 0.25
		370 MBq	0.001 ～ 0.025
	^{60}Co	37 GBq	0.55 ～ 14
		370 MBq	0.02 ～ 0.12
ガンマ線校正装置（中線量）	^{137}Cs	370 GBq	69
		37 GBq	6.9
		3.7 GBq	0.7
		370 MBq	0.07
ベータ線校正装置	^{90}Sr	74 MBq	100
中性子校正装置	^{252}Cf	200 MBq	nf 21
			nth 0.35
自然放射線（BG）レベル			－

放射線測定器（実用測定器）の測定精度を確保している。

また，校正用制御計算機が組み込まれ，操作の自動化による校正業務の省力化と効率化を実現している。

6　あとがき

人や地域環境での放射線管理用機器・システムについて，最近の成果を述べた。

今後は，放射線の安全管理にかかわる国内の実績を踏まえ，世界各地の原子力発電所などで働く人やその周辺住民の安全および広がる放射線利用にかかわる人の安全に積極的に寄与し，原子力利用の信頼向上に貢献したい。

透過検査や物質検査など放射線特性を用いた新たなソリューションの提供に貢献していく所存である。

最後に，電力会社をはじめ，放射線・原子力利用施設の放射線安全管理関係者からのご助言とご指導に感謝する。

参考文献

(1) 世界の原子力発電開発の動向. 日本原子力産業協会. 2009.
(2) Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030. IAEA 2008.
(3) 小佐古敏荘ほか. “放射線安全の考え方と関連する基準の国際動向”. 日本原子力学会誌. 2008, vol.50, no4.
(4) IAEAの安全基準, http://www.iaea.org/Publications/index.html,（参照 2009-06-29).
(5) Nunomiya, T. et al. Proceedings of 11th International Congress of the International Radiat. Prot. Dosim. Protection Association. Madrid Spain, 2004-5, p.23-28.
(6) Nunomiya, T. et al. Proceeding of the 10th. Neutron Dosimetry Symposium, Progress in dosimetry of neutrons and light nuclei, Uppsala, Sweden, 2006-6, p.12-16.
(7) 松本栄治ほか. “個人被ばくモニタリングシステムの開発”. 2008年電子情報通信学会総合大会.
(8) Ito et al. DEVELOPMENT OF LARGE AREA PLASTIC SCINTILATION DETECTOR FOR RADIOACTIVE CONTAMINATION MONITOR, IRPA12, 2008-6.
(9) JIS Z 4388：2006.
(10) IEC 61098：2003.
(11) 特願2008-164588.（海外同時出願中）
(12) 日本保健物理学会. 第43回研究発表会.
(13) 日本放射線安全管理学会. 第6回JRSMシンポジウム.

藤本　敏明

放射線機器・システムのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エネルギーシステム統括部副統括部長。日本応用物理学会会員。

石倉　　剛

放射線モニタの開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部東京工場放射線装置部課長。日本保健物理学会会員。

伊藤　勝人

放射線機器・システムのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部エネルギーシステム統括部放射線システム部主査。日本保健物理学会会員。

排ガスを監視する環境計測システム

Environmental Automated Measuring Systems for Flue Gas

中村　裕介 Yusuke Nakamura　　金井　秀夫 Hideo Kanai　　平山　紀友 Noritomo Hirayama

日本・欧州・中国などの各国では大気汚染を防止するため，法律による排ガス規制が実施されている。煙道の排ガスを採取し前処理するサンプリング式ガス分析計からなる現状の連続排ガス計測システムでは，長期安定測定を実現するために，サンプリング配管の詰まりや汚れの除去，分析計の定期的な校正，サンプリング導管加熱による消費電力の大きさなどの課題があった。富士電機の7成分同時測定ガス分析装置では，HCl測定にこれらの課題を解決できる直接挿入レーザ方式を適用した。さらにほかの測定成分についても直接挿入レーザ方式を適用できるよう研究開発を進めている。

Flue gas regulations have been enacted into law in order to prevent air pollution in countries such as Japan, Europe and China. With a conventional-type continuous flue gas measuring system consisting of a sampling-type gas analyzer that samples flue gas and performs pre-processing, the realization of long-term stable measurements has encountered such problems as requiring the removal of blockage or contamination in the sampling pipe, periodic calibration of the analyzer, increased power consumption of heating tube, and so on. Fuji Electric's simultaneous seven-component measuring gas analyzer uses cross stack laser method for HCl measurement and is capable of overcoming the above problems. Fuji Electric is also advancing research and development so that the cross stack laser method can be used for measuring other components.

1 まえがき

火力発電，ボイラや鉄鋼生産，セメント生産などの各種工業炉から排出される燃焼排ガスは固定発生源と言われ，大気汚染の大きな原因の一つとなっている。近年，中国，インド，ロシアなどでは活発な生産活動により急速にGDPが上昇している。排ガス，排水による地球規模の環境汚染が深刻化しており，「京都議定書」を中心とした環境保全への取組みが各国で必須の状況となっている。排ガス規制は，日本，欧米では各業界にすでに展開され実績が出ている。一方，中国では，先進国の排出基準を基本に法制化と実施が国家プロジェクトとして進められているが，まだ大規模な事業所に限られている。インド，ロシアでは，法制化が進行している状態で本格的な実施はこれからである。

排ガス中の規制物質測定には，公定法（国際機関，国家もしくはそれに準ずる公定試験機関，研究所において指定された分析方法）である手分析に加えて，排出物質の総量計測のために連続自動分析計を組み込んだ環境計測システムの設置が義務付けられている。排ガス用の環境計測システムは，連続排ガス監視システム（CEMS：Continuous Emission Monitoring System）と呼ばれ，各国で承認された分析計を搭載しており，規制物質の濃度，温度，圧力，流量の測定，帳票管理，監督官庁へのデータ伝送など機能を持つ。世界的な環境保全への取組みからCEMS市場は拡大している。特に中国のCEMS市場は年間10％以上の拡大が見込まれ，日本，欧米，中国国内の分析計メーカーがこの分野に参入している。

富士電機のオートメーション事業は，“エネルギー，環境・安全”を技術の中心に据え，社会に貢献することを目指している。排ガスを監視する環境計測システムの開発は，センシング，データ処理，伝送など，重要なオートメーション技術を駆使している。ここでは，富士電機の排ガスを監視する環境計測システムとその実施例，および今後の展望について述べる。

2 排ガスに関する各国の法規制

各国の大気汚染防止に関する法規制について，**表 1** に示す。日本においては，1960年代からの産業の発展により，煙突から排出された排ガスに含まれる亜硫酸ガス，窒素酸化物を原因とした光化学スモッグによる健康被害が発生した。政府はこれを受けて「大気汚染防止法」（1968年）を制定し，ばい煙の排出規制を実施した。その後，脱硫，脱硝設備，集塵（しゅうじん）器などの公害防止設備により排ガスを洗浄除去する技術とともに規制物質を連続自動測定する技術が発達してきた[(1)]。

欧州では，1950年代から大気汚染防止に関する法規制が本格化し，排ガス排出量の大きい事業体から順次排ガス監視システムの設置が進み，日本，欧州ではその設置はほぼ完了している。今後は，地方条例強化などにより低濃度監視や水銀など新たな規制物質に対して自動連続測定器の追加，設置が見込まれる。

中国では，1997年の大気汚染物の総合排出基準，2002年排ガス連続分析計の技術要求規格が欧米の規格を基準として制定され，大都市近郊の大規模な石炭火力発電所から排出規制が始まった。日本，欧米に比べるとまだ規制は緩いが，今後，2万機以上ある中規模以下のボイラ，加熱炉への排出規制の拡大は，規制物質の追加とともに加速していくことが推測される。

表１　各国の大気汚染防止に関する法規制

項　目	日　本	欧　州（EU）	中　国
法規制 関連法令	1968年　大気汚染防止法 1964年　電気事業法 1993年　環境基本法	1996年　大気質枠組指令 2000年　廃棄物焼却指令 2001年　大規模焼却施設指令	1997年　大気汚染物の総合排出基準 1997年　業種別排出基準施行
測定器の 認証	1996年改正　計量法 JIS	2004年　欧州基準　EN14181 2002年　EN14956	2002年　中国環境保護関連標準（HJ/T 76-2001）“固定汚染源排出ガスの連続監視システムの技術要求と測定方法”
認証機関	JQA（日本品質機構）	TÜV（ドイツ） MCERTS（イギリス）　など	環境省
環境基準 要素	〈測定成分〉〈レンジ〉〈測定方式〉 SO_2　0~50 ppm～　赤外線式，紫外線式 NO_x　0~50 ppm～　赤外線式，化学発光式 CO　0~50 ppm～　赤外線式 CO_2　0~20%～　赤外線式 O_2　0~25%　磁気式，ジルコニア式 ばいじん　0~100 mg/Nm^3～　光透過式，静電容量式 塩化水素HCl　0~50 mg/Nm^3～　イオン電極式，赤外線式 ○業種により測定成分，濃度の違いあり	〈測定成分〉〈レンジ〉〈測定方式〉 SO_2　0~50 ppm～　赤外線式，紫外線式 NO_x　0~50 ppm～　赤外線式，化学発光式 CO　0~50 ppm～　赤外線式 CO_2　0~20%～　赤外線式 O_2　0~25%　磁気式，ジルコニア式 ばいじん　0~100 mg/Nm^3～　光透過式，静電容量式 塩化水素HCl　0~50 mg/Nm^3～　赤外線式 ○業種により測定成分，濃度の違いあり	〈測定成分〉〈レンジ〉〈測定方式〉 SO_2　0~500 ppm～　赤外線式，紫外線式 NO_x　0~500 ppm～　赤外線式，化学発光式 O_2　0~25%　磁気式，ジルコニア式，ガルバニ式 ばいじん　0~1,000 mg/Nm^3　光透過式，静電容量式 塩化水素HCl　0~1,000 mg/Nm^3　赤外線式 ○業種により測定成分，濃度の違いあり
試料ガス 採種方法	直接採取方式，直接挿入式	直接採取方式，直接挿入式	直接採取方式，希釈方式，直接挿入式

3　現状の連続排ガス監視システム

図１に窒素酸化物（NO_x），二酸化硫黄（SO_2），酸素（O_2），塩化水素（HCl）を測定する連続排ガス監視システムの例を示す。煙突には，排ガスを測定するガス採取器，ダスト計，圧力計，温度計，流量計（ピトー管＋差圧計）が設置されている。排ガスは，ガス採取器の1次フィルタでダストを除去後，サンプリング機器でダスト，水分を除去して分析計に導入され各測定成分を連続的に測定する。塩化水素測定は，測定方式が異なるため独立した専用の分析計で測定する。各測定値は，コンピュータまたは，DCS（Distributed Control System）に送られ，温度，圧力補正とデータの収納，帳票化を行い監督官庁に測定値と機器の状態を定期的に伝送している。供給電源には，無停電電源を使用することもある。連続排ガス監視システムは，空調された分析室や分析ハウス内に収納されている。連続排ガス監視システムを長期間安定運転させるために必要な課題は，次のとおりである。

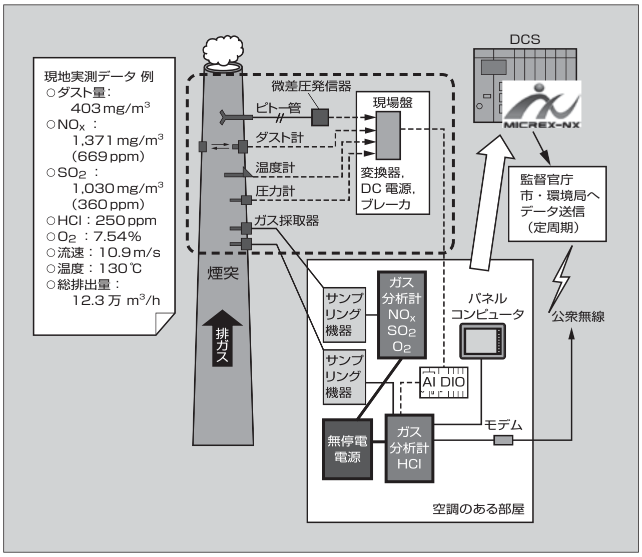
(1)　サンプリング機器の安定性

サンプリング式の分析計では，プラントに合致した試料ガスの前処理が必須であり，サンプリング機器の安定性は重要である。特に石炭を主燃料とする中国の燃焼排ガスでは，配管のつまりや汚れの原因となる硫酸ミスト，ダストの除去に注意が必要になる。

(2)　分析計の取扱い

測定値異常のトラブルを解決するには専門知識を必要とするため，トラブル解決スキルを持った連続排ガス監視システムメーカーのサービスマンの確保，育成が必要になる。分析計では測定成分により測定方式（**表１**）が異なることも取扱いの難しさにつながっている。

図１　連続排ガス監視システムの例



(3)　分析計の定期的な校正

分析計は，精度を維持するために測定成分ごとにトレーサビリティのある標準ガスで定期的な校正が必要になる。校正周期は1週間から1か月に一度である。電磁弁を組み合わせたシーケンスにより自動校正も可能であるが，配管の異常やボンベが空になった時の対応に不安があり人的チェックは欠かせない。また，定期的な標準ガスの準備は大きなコストである。

(4)　電力消費

試料ガスを分析装置まで導入するガス採取器や配管は，結露による測定成分の溶解損失の削減や，金属部分の腐食防止のために100℃以上に加熱されている。サンプリング

導管は，30 mから50 mに及ぶこともあり，消費電力が全体の50%以上になる。イオン電極式の塩化水素（HCl）計を含むNO_x，SO_2，CO，O_2の連続排ガス監視システムは，加熱導管が各分析計に必要となるために消費電力の合計は，4,000 VAを超える。また，設置周囲温度条件を超える環境に設置する場合は，空調された分析用ハウスまたは室内に設置されることが多く，連続排ガス監視システムとしての消費電力は大きくなる。

以上の課題をまとめると，硫酸ミストやダストに強い影響を受けないで，分析計の取扱いが簡単でしかも維持コストの少なく安定して連続測定できる計測システムが望まれている。

4　富士電機の提案する環境計測システム

排ガスを監視する環境計測システムの核である**図2**の7成分同時測定ガス分析装置「ZSU-7」について記述する。

4.1　環境計測システム

ZSU-7は，前述の課題を解決するために，サンプリング式によりNO_x，SO_2，CO，CO_2の4成分を赤外線式で，O_2をジルコニア式で測定する。また，HClはサンプリング機器の不要な直接挿入レーザ方式で，ダストは静電誘導式で測定する一体型分析装置[(2)]である。すべての測定成分についてサンプリング機器を完全に不要にすることはできていないが，塩化水素測定には直接挿入レーザ方式分析計を採用した。直接挿入レーザ方式による課題解決の効果は大きい。

図2　7成分同時測定ガス分析装置「ZSU-7」の外観

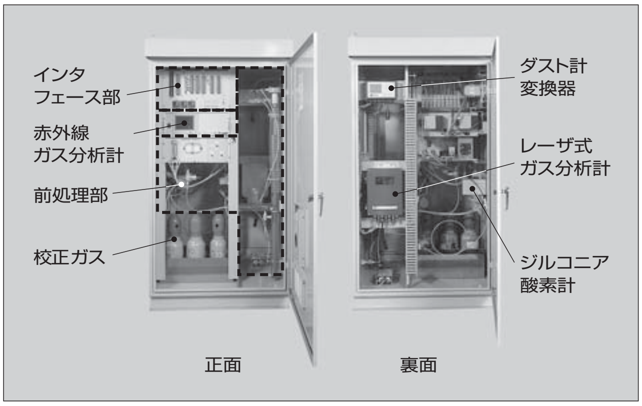
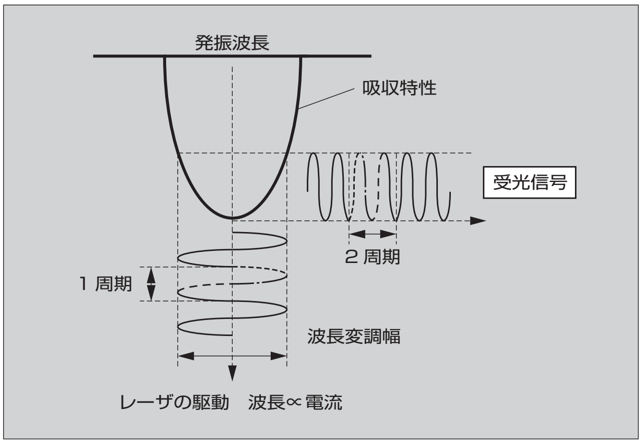


図3　レーザ式ガス分析計の測定原理



4.2　測定方式

(1)　レーザ式

レーザ式ガス分析計の測定原理を**図3**に，設置概略図を**図4**に示す。測定ガスによる赤外の吸収強度と濃度の関係は，従来の赤外線ガス分析計と同じように式(1)のランベルト・ベールの法則で表せるが，濃度の検出方法は異なる。光源である赤外半導体レーザの発振波長を一定周期で変調し，測定ガス成分の吸収スペクトル付近をスキャンする。この時，ガス濃度に応じて試料ガスを透過したレーザ光は吸収され，受光部への透過光量が減衰する。この透過光量を受光部のフォトダイオードで検出し，変調信号の2倍周波数を同期検波により検出することでガス濃度を測定する[(3)(4)]。

赤外線吸収の強さと濃度の関係はランベルト・ベールの法則に従い，式(1)で表せる。

$$I = I_0 e^{-kCL} \quad \cdots\cdots (1)$$

I ：透過赤外光の強さ
I_0：発光赤外光の強さ
k：吸収係数
C：測定成分濃度
L：測定セルの長さ

(2)　赤外線式

図5に赤外線ガス分析計の構成図を示す。

赤外線式ガス分析計は，実績のある非分散型赤外線式の

図4　レーザ式ガス分析計の設置概略図

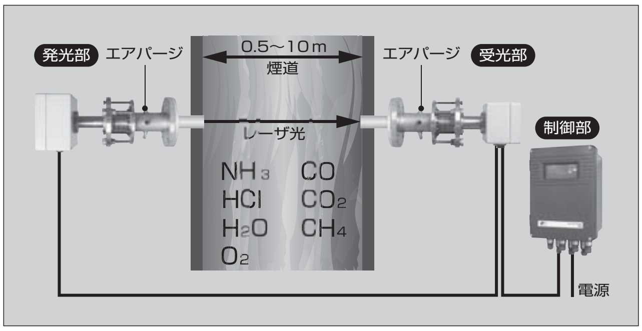
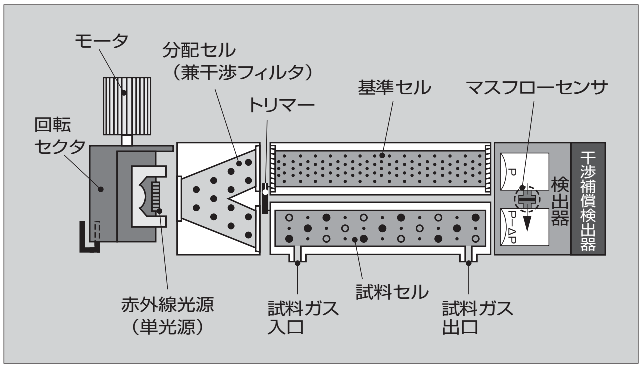


図5　赤外線式ガス分析計の構成図



複光束式を採用している。赤外線光源から発せられた光は分配セルで2分され，赤外線吸収のない不活性ガスを封入している基準セルと試料ガスが流れる試料セル内に照射される。赤外線が入射すると，試料セルではガス濃度に応じた赤外線が吸収される。

検出器には基準セル，試料セルを透過してきた赤外線を受光するための二つの検出槽がある。検出槽には測定成分と同じガスが封入されており，吸収の差により二つの槽には，光量に比例した圧力差が生じる。検出槽の圧力差ΔPと相関があるマスフローセンサの抵抗変化ΔRから測定ガス濃度Cは式(2)で表せる。

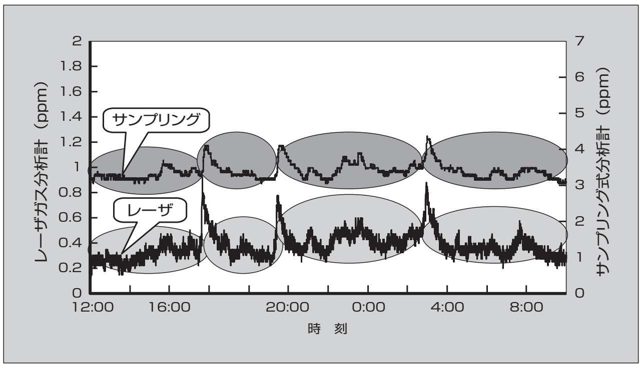
$$\Delta R \propto \Delta P \propto I_0 - I = I_0(1 - e^{-kCL}) \fallingdotseq kCL \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

4.3　実施例

レーザ式ガス分析計と赤外線ガス分析計を組み合わせた連続自動測定システムについて，東京都内某所の一般廃棄物焼却施設で半年間フィールドテストを行った事例を紹介する。

図6 にサンプリング式の塩化水素計とレーザ式ガス分析計の測定値の相関を示す。

図6　サンプリング式塩化水素計とレーザ式分析計の相関



サンプリング式の塩化水素計のガス採取器は，レーザ式分析計とほぼ同位置に設置されている。

出力トレンドを見ると連動して相関関係があるのがよく分かる。この期間の手分析値は，平均0.5 ppmHClでレーザ式分析計との相関が得られた。ゼロ点変動は，半月間の変動が0.5%フルスケール以下と安定性も良い。

消費電力は，サンプリング式塩化水素計を組み合わせた排ガス連続監視システムに比べて2,000 VA以上の削減が可能となった。

4.4　直接挿入レーザ方式ガス分析計の特長

直接挿入レーザ方式ガス分析計の特長を**表2** に示す。

直接挿入レーザ方式ガス分析計は，サンプリング機器がなくパージガスの管理のみで良い，6か月あたり±2%フルスケールの長期安定性により分析計の保守，校正頻度が少ない。加熱式のサンプリング導管が不要なためサンプリング式の分析計に比べて40%以上省電力である。サンプリング式イオン電極式の塩化水素計と比較すると，保守に関するライフサイクルコストを半分以下に低減できる。

5　将来に向けた取組み

直接挿入レーザ方式ガス分析計は，すべての規制物質に対して測定が可能となれば，前述の一連の課題を一挙に解決できると確信をしている。現状の直接挿入レーザ方式ガス分析計は，光源として使用できる半導体レーザは近赤外波長帯（700〜2,000 nm）の範囲だけが製造可能なので，検出成分と計測感度，そして同時に検出可能な成分数が限定されている。大気環境を監視する上でNO，NO_2，SO_2は，吸収波長が中赤外波長帯（4,000〜8,000 nm）にあるため困難で，任意の複数成分を同時計測ができないという課題がある。

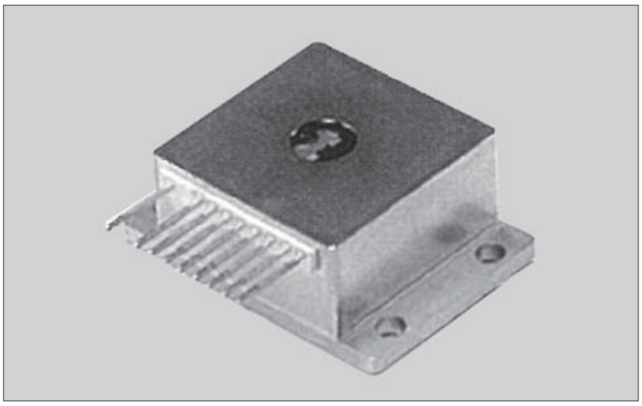
富士電機は，浜松ホトニクス株式会社との共同研究を通

表2　直接挿入レーザ方式ガス分析計の特長

項　目	赤外線ガス分析計 イオン電極式	直接挿入レーザ方式 ガス分析計	直接挿入レーザ方式 ガス分析計の特長
試料ガス採取方法	サンプリング式	直接挿入式	シンプルな測定系
前処理 サンプリング機器	必　須	パージガス以外不要	ライフサイクルコストの低減 消費電力低減
測定ガス	NO，NO_2，SO_2，HCl， NH_3，CO，CO_2，CH_4…	HCl，NH_3，CO，CO_2，O_2， CH_4，H_2O （ NO，NO_2，SO_2 ）※1	NH_3，HClなど水溶性，吸着性のあるガスが損失なく測定できる
応答速度	2〜4分（導管含まず）	1〜5秒	プラント制御に適用できる 各測定成分の応答ずれなし
耐ダスト	最大0.5 g/Nm^3	最大30 g/Nm^3·m	燃焼管理，脱硝設備管理に前処理なしで適用できる
保守性	年間で12〜24回	年間で1〜2回	ライフサイクルコストの低減 保守部品少ない
校　正	年間で53回（毎週）	年間で1〜2回	ライフサイクルコストの低減
他ガスの干渉	測定成分，濃度により対策	少ない	ほとんどない
安定性	1週間で±2%フルスケール	6か月で±2%フルスケール※2	ゼロ点の安定性良い ライフサイクルコストの低減

※1：開発取組み中のガス
※2：フルスケール：測定範囲（レンジ）

図７　量子カスケードレーザ光源の外観



じ，中赤外波長帯（波長4,000～8,000 nm）で発光可能な量子カスケードレーザを用い，NO，NO_2，SO_2検出に向けての開発に取り組んでいる。開発した波長7,300 nmで発光し，SO_2を検出可能な量子カスケードレーザ光源の外観を**図７**に示す。SO_2検出は，すでに従来のサンプリング式ガス分析計と同等の感度を確認しており，実用段階になってきている。

6　あとがき

本稿で紹介したとおり，直接挿入レーザ方式ガス分析計は，省電力であるだけでなく，従来のサンプリング式ガス分析計にはない高速応答性や保守部品が少ない良好な保守性を生かして，適用範囲が拡大していくと考えられる。環境保全の意識が世界中で高まる中，測定成分の追加と多成分化は必須であり，今後開発にまい進し，富士電機のオートメーション技術を活用した環境技術で社会に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　森正樹. 試料吸引方式分析計のJIS化の経緯とその内容. 計装. 2009, vol.52, no.2, p.64-67.

(2)　小林貞昭ほか. 煙道排ガス用7成分同時測定ガス分析装置. 計測技術. 488. 2009, vol.37, no.5, p.4-7.

(3)　Peter, W. et al. Near-and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis. Optics and Laser in Engineering. 37. 2002, p.101-114.

(4)　金井秀夫ほか. 直接挿入レーザ方式ガス分析計「ZSS」. 富士時報. 2008, vol.81, no.2, p.179-182.

中村　裕介

水質計の設計開発およびガス分析計の開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部計測機器センター電子・環境機器部マネージャー。大気環境学会会員。

金井　秀夫

油膜センサ，水質安全モニタなどの水質系の設計開発を経てガス分析計の開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部計測機器センター電子・環境機器部主任。計測自動制御学会会員。

平山　紀友

工業用計測機器，光応用機器の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社生産技術センター機器技術研究所グループマネージャー。ISA 学会会員。

オートメーションを支えるインテリジェントフィールド機器

Intelligent Field Devices for Development of Automation Systems

福住　光記 Mitsunori Fukuzumi　　小高　秀之 Hideyuki Odaka　　中川　昌文 Masafumi Nakagawa

富士電機は“現場の見える化”により，現場情報を経営レベルの計画・管理処理に反映させて，経営課題解決のためのオートメーションシステムを提供している。“現場の見える化”のためのキーコンポーネントであるインテリジェントフィールド機器は，ネットワーク技術，計測・制御技術，電子化技術，組込みソフトウェア技術，セーフティ技術および小型化・省電力化技術などから構成されている。スマートエネルギーやセーフティインダストリ，グリーンソシオなどの分野で，インテリジェントフィールド機器を用いたオートメーションシステムを実現している。

Fuji Electric provides the solution for management problems on planning and control of automation systems with On-site visualization of field information. Intelligent field devices with Key function such as On-site visualization are consisted of technologies of every kind. These technologies are network, measurement and control, electronic and embedded software, safety and down-sizing and power-saving. Fuji Electric realizes Automation systems with intelligent field devices in the fields of smart energy, safety industries and green-socio.

1　まえがき

オートメーションシステムを構成するセンサ，アクチュエータ，I/O 機器などフィールド機器のインテリジェント化が進んでいる。目的は機器単体だけでなくシステム全体の信頼性，安全性，保守性を向上すること，複雑化・多様化するシステムに容易な方法で柔軟に対応することおよびシステムの総保有コスト（TCO）を低減することである。

フィールド機器のインテリジェント化は，ネットワーク技術，計測・制御技術，電子化技術，組込みソフトウェア技術，セーフティ技術，および小型化・省電力化技術により実現されるものであり，これらの技術革新とともに進展してきた。富士電機では，これら幅広い技術により，フィールド機器のインテリジェント化を図ることで“現場の見える化”を実現し，現場の情報を経営レベルの計画・管理処理に反映し，経営課題を解決するオートメーションシステムに取り組んでいる。本稿では，インテリジェントフィールド機器の技術的取組みとともに商品事例を紹介する。

2　技術動向と富士電機の取組み

2.1　フィールド機器の進化

フィールド機器として代表的な計測機器の変遷を見ると，初期のアナログ式現場型計測・操作表示機器から始まり，デジタル技術，ネットワーク技術の進展により現場での計測値を電流信号（DC4 ～ 20 mA）またはデジタル値に変換し，監視操作室の DCS（Distributed Control System）など上位システムに取り込むことによる集中監視・制御方式に進化してきた。また，計測値・操作値以外に機器の動作設定のためのパラメータ情報や RAS（Reliability, Avilability, Serviceability）情報を持ち，ネットワークにより上位の装置と連携することでシステムの制御性能・操作性・保守性向上を図ってきた。計測・制御機能の点では，オートチューニングやファジイ制御機能を実装するなどの進化を図ってきた。さらなる技術革新による CPU の性能向上やメモリの大容量化，ネットワークの高速・高機能化は，フィールド機器のいっそうの高性能化・高機能化を実現してインテリジェント化を加速している。

例えば，従来上位コントローラが実行してきた制御機能をフィールド機器に取り込み，ネットワークを介して機器間で協調制御する構成とすることで，システムの簡素化とともに障害発生時の影響の局所化，試験・調整の効率化を図っている。また，より高度な自己診断機能や動作履歴情報およびトレンド情報を蓄積し，リアルタイムに解析する異常予知機能により，信頼性・保守性の向上を図っている。

富士電機では，オートメーションシステムを構成する，計測機器やインバータなどの各種機器においてこのようなインテリジェント化を進めている。

2.2　インテリジェント化技術

フィールド機器のインテリジェント化および実現技術の動向を**図1**に示す。

(1)　ネットワーク技術

ネットワーク技術はオートメーションシステムにおいて最も重要な技術の一つであり，ネットワーク技術の変化によりシステムの構成方法も大きく変わってきている。すなわち，フィールド機器と上位のコントローラや監視装置を接続するフィールドレベルのネットワークにおいて，一般的なサイクリック通信機能に加えて，フィールド機器からのイベントやアラーム情報の自動発報を可能とするイベント通信機能や，ネットワーク上の機器間の同期および協調

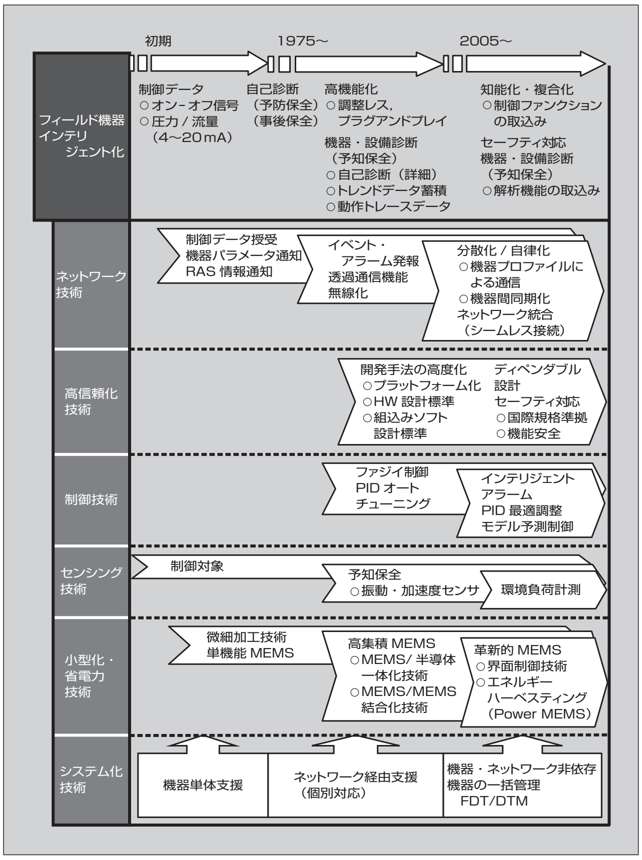


図1　フィールド機器のインテリジェント化技術動向

制御を可能とする同期通信機能を持つようになってきている。

また，省配線化や配線の難しい場所や移動体にも機器を設置したいという強い要求に応えるため，フィールド機器の無線化対応も進んでいる。富士電機ではこれらの通信機能および無線ネットワーク対応で，フィールド機器のインテリジェント化を実現している。

さらに，ネットワークがフィールド・制御・情報レベルに階層化されているシステムに透過通信機能を適用すると，階層をまたがった通信が容易に行える。富士電機では，透過通信機能を用い，上位の情報系サーバから下位のコントローラ，さらに下位に接続されるフィールド機器を，ネットワークの違いを意識することなくアクセスできるシームレスなシステムの実現に向け取組みを進めている。

⑵　高信頼化・セーフティ技術

機器およびシステムの信頼性，安全性を高めることがいっそう重要となってきている。一方，フィールド機器のインテリジェント化が進むに伴い，内部の組込みソフトウェアは増大し，処理実行の仕組みも複雑になってきている。

このため，富士電機では従来取り組んできた高信頼化方式および設計手法に加え国際標準規格（IEC 61508 など）で規定されている安全の考え方や設計手法の適用を進めている。また，ハードウェア，ソフトウェアともに，機器に依存しない共通部分をプラットフォームとして標準化し，各種機器はプラットフォームを基に V モデルと呼ばれる設計手法に基づき開発する取組みを行っている。

⑶　センシング技術

従来のセンシングの対象は，速度・流量・温度など制御量が主であったが，新たに機器やシステムの安全性，保全性の向上や省エネルギー（省エネ）などのニーズが強くなってきており，オートメーションシステムにおけるセンシングの対象も変わってきている。

富士電機ではこれらのニーズへの対応として，振動センサを用いた回転機の余寿命診断や，環境センサ（温度，湿度，照度，ガスなど）を用いた省エネや安全の実現を図っている。このようなニーズはいっそう強くなっておりフィールド機器の機能の一つとして付加していくことが有効である。

⑷　小型化，省電力化技術

フィールド機器のインテリジェント化に伴い，メモリ容量や電源容量などが増大する傾向にあり，小型化，省電力化は必須の課題である。

富士電機では，小型化，省電力化への対応の核となる技術として MEMS の適用を進めている。従来の MEMS 技術に加えて，CMOS 技術を融合し，さらなる小型化の実現を目指すとともに，エネルギーハーベスティング技術を使った自己給電方式のセンサの研究を行って，省エネならびに電源レス，配線レスによる小型化の実現に取り組んでいる。

⑸　システム化技術

機器単独だけでなく他の機器およびコントローラや情報系サーバなどと組み合わせてシステム化することで，フィールド機器のインテリジェント化の効果が生まれる。重要なシステム化技術の一つとして，IEC で標準化が進められている FDT/DTM[(3)]（Field Device Tool/Device Type Manager）技術がある。FDT/DTM では，機器ごとに異なる実装機能およびデータ配列などを定義し，それらの情報を他の機器・装置がプリンタのドライバソフトのような形で認識することにより，相互にアクセスすることを可能としている。このことにより，FDT/DTM ではネットワークの違いや機器の違いを意識しないでシステム化することができる。

富士電機は，自社の機器だけでなくシステムに接続された全てすべてのフィールド機器を統一的に管理していくことを狙いとし，フィールド機器ならびにコントローラへの適用を進めている。

3　インテリジェントフィールド機器の事例

図2 にオートメーションシステムの構成例を示す。インテリジェントフィールド機器は同図の最下層とその上の監視・制御の階層に位置する。各機器によって収集された“現場の見える化”情報は，フィールドコネクタ[(4)]と接続することで，より広域な見える化を実現することができる。

図 2　オートメーションシステム構成例

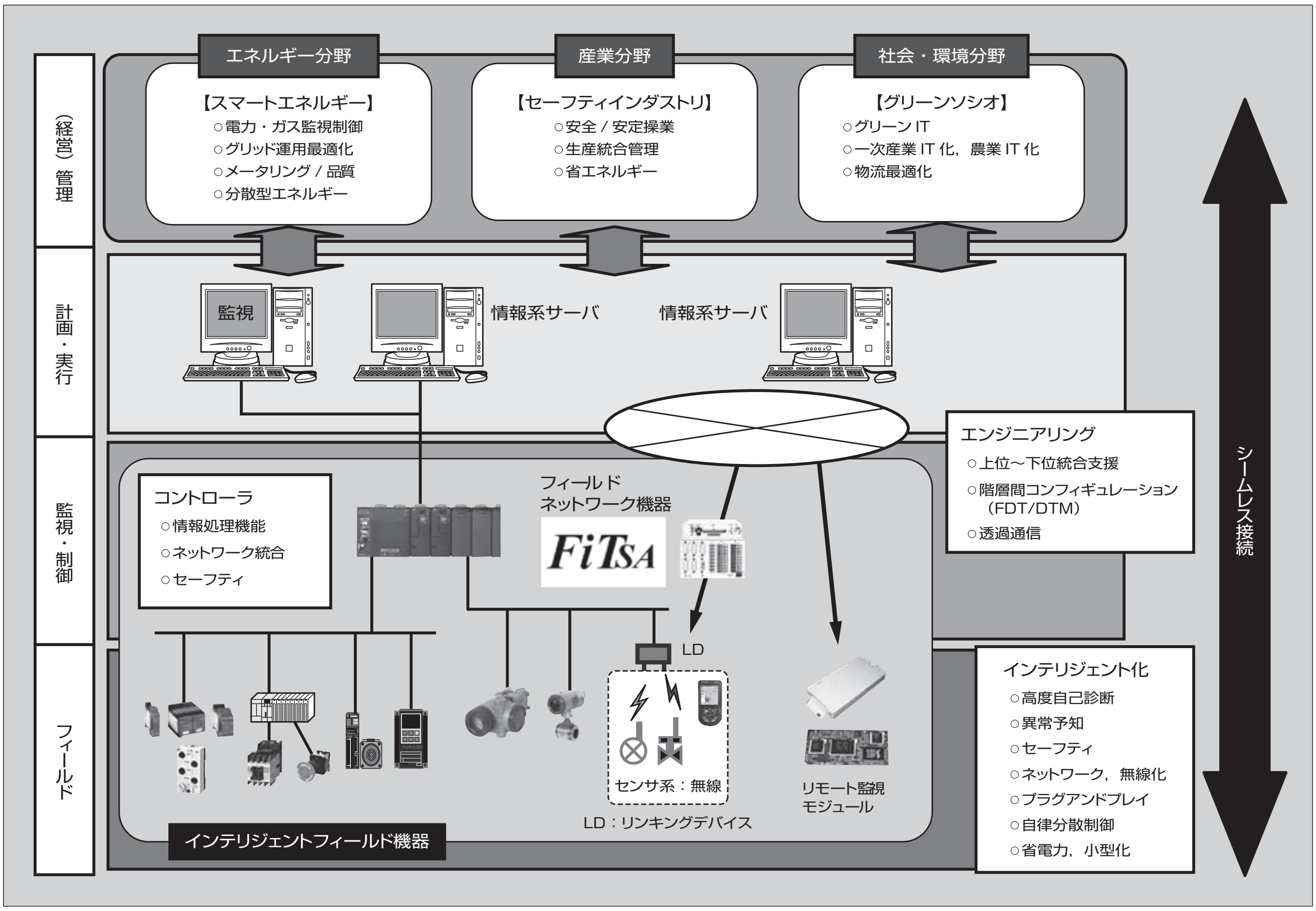
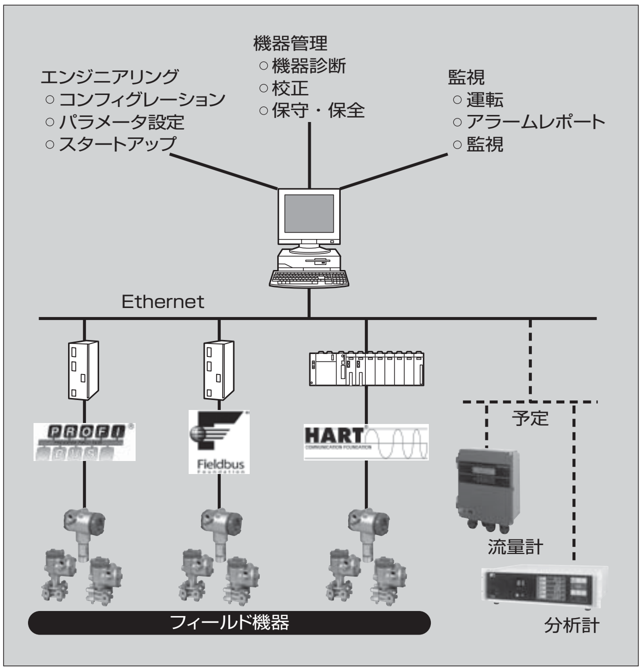


図 3　計測機器の FDT/DTM システム構成

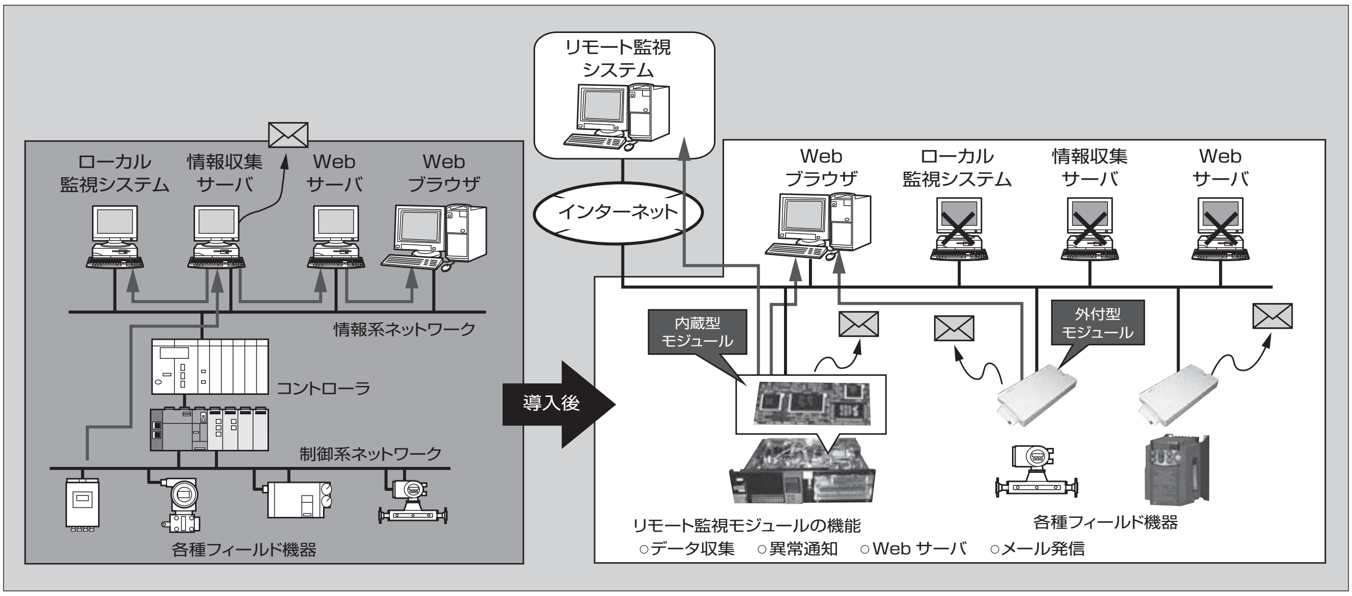


3.1　計測機器の FDT/DTM 対応

FCX シリーズ圧力・差圧発信器の FDT/DTM 対応を例に，フィールド機器のインテリジェント化について紹介する。FCX シリーズは，オープンネットワーク規格である HART，Foundation Fieldbus，Profibus などに対応している。また，インテリジェント化への取組みとして国際標準化（IEC）[(1)(2)] が進められているデバイス管理インタフェース，FDT/DTM 機能を実装している。FDT/DTM は通信仕様やメーカーの違いに左右されないオープンなデバイス管理を実現する規格であり，HMI（Human Machine Interface）をつかさどる FDT と機器固有のドライバである DTM からなる。FCX シリーズ用の DTM は，各デバイスのパラメータ設定・レンジ設定などのコンフィグレーション機能のほかに，予防保全を目的とした自己診断機能，設備保全のための調整履歴，故障解析用の温度履歴，誤操作防止用の書込みロック機能，入出力のリニアライズ補正などの機能を実装している。パソコンなどの上位システムの FDT からは，測定値のトレンド表示や運転監視，アラームレポートなどの機能も提供され，フィールド機器の稼動状況をリアルタイムで確認するとともに，設備管理として機器診断・定期校正・保守・予防保全を行うことができる。

開発した FDT/DTM は，昨年開催された FDT グループ日本支部主催のユーザセミナーでの各社公開実験にて接続性試験を行い，現在も実証実験を推進中である。**図 3** に

図 4　リモート監視モジュール



システム構成例を示す。

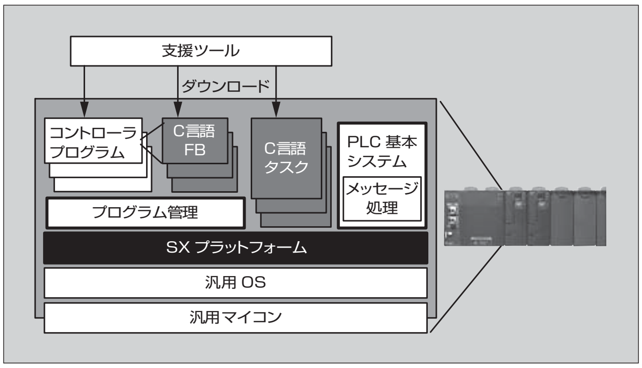
3. 2　リモート監視モジュール

フィールドに配置される既設の装置，機器の各種データを上位に上げるためには，中間層として情報収集サーバやWeb サーバを増設したり，また機器側に収集機能のソフトウェアを追加改造するなどが必要になる。その解決のためにフィールド機器に容易に実装でき，インテリジェント機能を実現できるリモート監視モジュールを開発した（**図 4**）。

本モジュールには，対象機器の各種データを収集する機能，アラームの自動発報機能，収集したデータを階層型にタグ名でアクセス可能な時系列データベース（トレンド，アラーム，RAS など）として作成する機能などのインテリジェント機能が標準装備されており，利用者は定義設定のみで容易な方法で，接続したい機種への対応が可能になる。

また，業界標準の通信プロトコルであるSOAP（Simple Object Access Protocol），データ形式はXML（Extensible Markup Language）などのオープンな技術を適用している。セキュリティについても十分な配慮を行っておりID とパスワードによる認証機能による機器個別のアクセス権制御機能を実装し，インターネット回線上はVPN（Virtual Private Network）を利用した暗号化によりセキュリティを確保している。モジュールは，富士電機の組込みハード/ファームウェアの共通プラットフォームを採用し，リアルタイムOS の機能を活用しながら，小型化・高信頼化を実現している。蓄積されたデータは，上位系からの通信コマンドによる読出し機能のほかにe-Mail による通知機能を持っている。さらには，モジュールにはWeb サーバ機能が実装されており，Web ブラウザ搭載パソコンを接続するだけで収集したデータの表示や設定変更が可能となり，現場での監視や保守作業を容易にしている。

図 5　C 言語オブジェクト組込み形式



3. 3　コントローラの高度化

フィールド機器のインテリジェント化は，コントローラの機能にも変化をもたらしている。すなわち，従来のコントローラの主な役割であった制御機能の一部はフィールド機器に実装され，コントローラはより上位のパソコンやサーバの機能であったデータ処理や情報連携機能を持つようになってきている。

事例として，コントローラ「MICREX-SX シリーズ」で取り組んでいるデータ処理を主としたPC 系機能統合とネットワークを介した情報連携機能について紹介する。

(1)　C 言語オブジェクトの組込み

生産状況の監視，トレーサビリティデータの蓄積や省エネ監視制御システムなどの高度情報処理の領域では，C 言語などの高級言語で記述することが有利なため，コントローラにパソコンを併用することが多くなっている。新コントローラ「SPH3000」では，これら併用機の機能を容易に統合できるように，C 言語オブジェクトの組込みを進めている。これにより，情報や管理系機能を，パソコンではなくフィールドに適した高信頼な監視・制御用コントローラで行うことができるようになる。

特集

図5に示すC言語オブジェクトの組込みは，従来のハードウェア・ソフトウェアのプラットフォームに，C言語FB（Function Block）またはタスクを追加する形式としている。これにより，開発期間短縮，品質の向上を図っている。

⑵　サポートツールと情報透過によるシームレス化

MICREX-SXシリーズでは，コントローラレベルのEthernetやFL-net，I/OレベルのDeviceNETやOPCN-1など多種のネットワークをサポートしている。また，各種フィールド機器の接続およびエンジニアリングにも対応している。これらのサポートツールは従来個別の対応であったが，現在ツールの統合を図っている。また，ネットワークの情報透過技術を用いたシームレス化を進めている。今後FDT/DTMの適用を進めて，ネットワークやフィールド機器の種類を問わないシステム構築のキーコンポーネントとして強化していく計画である。

3.4　フィールドネットワーク機器

ユビキタス時代にフィットする現場装置として，現場の装置・機器と簡単に接続し，欲しいときに必要な情報を簡単に提供できるようフィールドネットワーク機器「FiTSA」を開発した。OSには組込みLinuxを採用することで，個別アプリケーション開発，標準ソフトウェア開発，周辺システムとの連携を容易とした。**図2**に示すように計画実行の上位情報系とフィールドの下位制御系とを橋渡しする情報収集装置として活用しており，次の特長がある。

⑴　接続容易性

下位接続には，組立加工業種向けのプロトコル（2Dカメラ，RF-ID，計測機器など主力製品約20機種に対応），富士電機のコンポーネント機器のプロトコルへ対応した通信ドライバを搭載している。上位接続には，エンベデッドSQLクライアント，OPCサーバを搭載し，MES（Manufacturing Execution System）などの上位情報系との連携を実現した。また，FOMAインタフェースなどの標準ソフトウェアを用意し，広域ネットワークへの対応を可能としている。

⑵　多様な製品展開を支えるコア技術

状態遷移表型実行機構「eSCマトリックスエンジン」を搭載した。部品化されたソフトウェアの再利用，通信ドライバの選択や新規追加，パッケージソフトの選択などエンジニアリング性と信頼性を向上し，柔軟にカスタム対応できるソフトウェアを実装している。

4　あとがき

富士電機のオートメーションシステムのコンセプトは，“現場の見える化”を図り現場情報を経営レベルの計画・管理処理に反映させ，経営課題を解決することである。

すなわち，現場情報を活用することで，全体最適の視点での生産性向上を図るとともに信頼性・安全性および保守性・保全性を高め，さらに省エネルギーの環境対応の課題を解決することである。インテリジェントフィールド機器は，これらの課題解決のための“現場の見える化”を実現するものであり，オートメーションシステムにおいてもよりいっそう重要性を増すと考えられる。富士電機は，お客さまのニーズの把握とともに，さらなる技術開発や商品開発への取組みを進めていく所存である。

参考文献

⑴　IEC 61158 : 2007.11. Industrial communication networks-Fieldbusspecifications.

⑵　IEC 61804 : 2006.9. Function blocks（FB）for process control.

⑶　FDT Group.org : FDT Technical Description.

⑷　廣瀬文彦ほか. 制御システムプラットフォームによる生産性と品質の向上. 富士時報. 2009, vol.82, no.5, p.22-27.

福住　光記

コントローラの企画・開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部産業システム統括部副統括部長。電気学会会員。

小高　秀之

コントローラの開発設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部制御技術センター制御システム開発部主席。電気学会会員。

中川　昌文

計測機器のエンジニアリング業務および販促業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部計測機器センター営業技術部長。計測自動制御学会会員。

オートメーションを支えるワイヤレスネットワーク

Wireless Network Technology for Automation Systems

畠内　孝明 Takaaki Hatauchi　　小林　芳邦 Yoshikuni Kobayashi　　町田　潤一 Junichi Machida

富士電機は，監視や計測・自動検針などの用途で，多くのワイヤレスネットワークの応用システムを提供している。プロセス制御用途でも，無線規格 ISA100.11a を適用した製品を試作している。近距離無線通信の国際規格（IEEE802.15）に，富士電機で実績のあるメッシュネットワークに適したアクセス方法を提案している。メッシュネットワークの設置調整を簡単化するツールなどを共通プラットフォームとして整備している。特徴ある技術としては，低消費電力メッシュネットワークや多数タグ読取り技術などがあり，電力量計の無線遠隔検針やタグ型モータ振動診断などの製品で実用化している。

Fuji Electric provides automation systems that utilize various wireless network technologies for such applications as monitoring, measurement and automatic meter reading. A prototype product that uses the ISA 100.11a wireless standard is also being fabricated for process control applications. An access method using a mesh network, with which Fuji Electric has a history of successful applications, is proposed for the IEEE 802.15 international standard for short-range wireless communication. Tools for facilitating the installation and adjustment of mesh networks are prepared as part of a shared platform. Low energy consumption mesh networks and multiple tags reading technology are examples of Fuji Electric's distinctive technology, and are being used in such practical applications as the wireless remote reading of a wattmeter and reading tags for a motor vibration diagnosis.

1　まえがき

工場やプラントに配置された設備の状態を管理するためには，ワイヤレスネットワーク技術が欠かすことのできない技術になりつつある。このような現場におけるワイヤレスネットワークの技術には，**表1**に示すような要件が求められる。

制御・監視用途では即時性や高品質が求められる一方で，計測・検針・保全用途では広域で多数の端末が求められる。現在，実用化されているのは，計測・検針・保全用の無線や即時性を必要としない監視用の無線であるが，今後は即時性が高く高品質通信が要求される制御用途に使える無線技術を開発していく必要がある。

本稿では，富士電機の無線技術の標準化への取組みや，開発・設計・据付け調整・保守の効率化のために無線技術を共通プラットフォーム化する取組みを紹介する。さらに，特徴のある技術としてメッシュネットワーク技術と多数タグ読取り技術の概要を紹介する。最後に富士電機の無線技術の応用例の一部を紹介する。

表1　オートメーションの各種用途で求められる通信条件

用途分類	制　御	監　視	計測・検診・保全
トポロジー	スター，メッシュ		メッシュ
通信距離	数～数十 m		数十～数百 m
通信速度	数 Mbits/s	数 M～100 Mbits/s	1 Mbits/s 以下
通信頻度	即時性必要		1 回 / 分～時間，月
データ量	小	小～大	小
端末数	数～数百台		数百～数万台
通信品質	高		中

2　標準化への取組み

図1に無線技術の動向と富士電機製品を示す。移動通信のデジタル化，広帯域化と並行して無線 LAN の普及が進み，いまや無線利用によるインターネットサービスはいつでもどこでも質の高いサービスが受けられる。このような人が行う通信とは別に，ユビキタスセンサネットワークと呼ばれるあらゆる場所のあらゆる対象のデータを管理するための無線技術も盛んに研究[(2)]され，例えば UHF 帯の標準化がなされている。オートメーションシステムで必要とされる技術はこのような無線技術であり，富士電機においても，物品に RFID タグやセンサ付タグを取り付けて管理するシステムや，メータ・計測器を遠隔から読み取るシステムなどの製品を提供してきた。

オートメーションシステムでいろいろな機器およびデータを扱う場合は，オープンな機器によってシステムを構成し，最適なシステムを顧客に提供する必要がある。このためには標準化されたインタフェースを持つ無線機の開発が必要である。次に，富士電機の標準化活動を紹介する。

2.1　工業用無線通信規格（ISA100.11a）への取組み

工業用無線通信の規格化が ISA（The International Society of Automation）によって行われている。ISA 100.11a[(3)]は 2009 年 4 月にドラフトが承認され，ANSI の承認を経て正式リリースされる見通しである。並行して認証の準備やロゴプログラムを推進するための機関 WCI（ISA100 Wireless Compliance Institute）が設立された。

富士電機では ISA 100 委員会と WCI に参加するとともに，いち早く ISA 100.11a を組み込んだ発信器を試作した。そして 2008 年 10 月に米国テキサス州ヒューストンで開催された ISA Expo において，**図2**に示すように，他社製品

図 1　無線技術の動向と富士電機製品

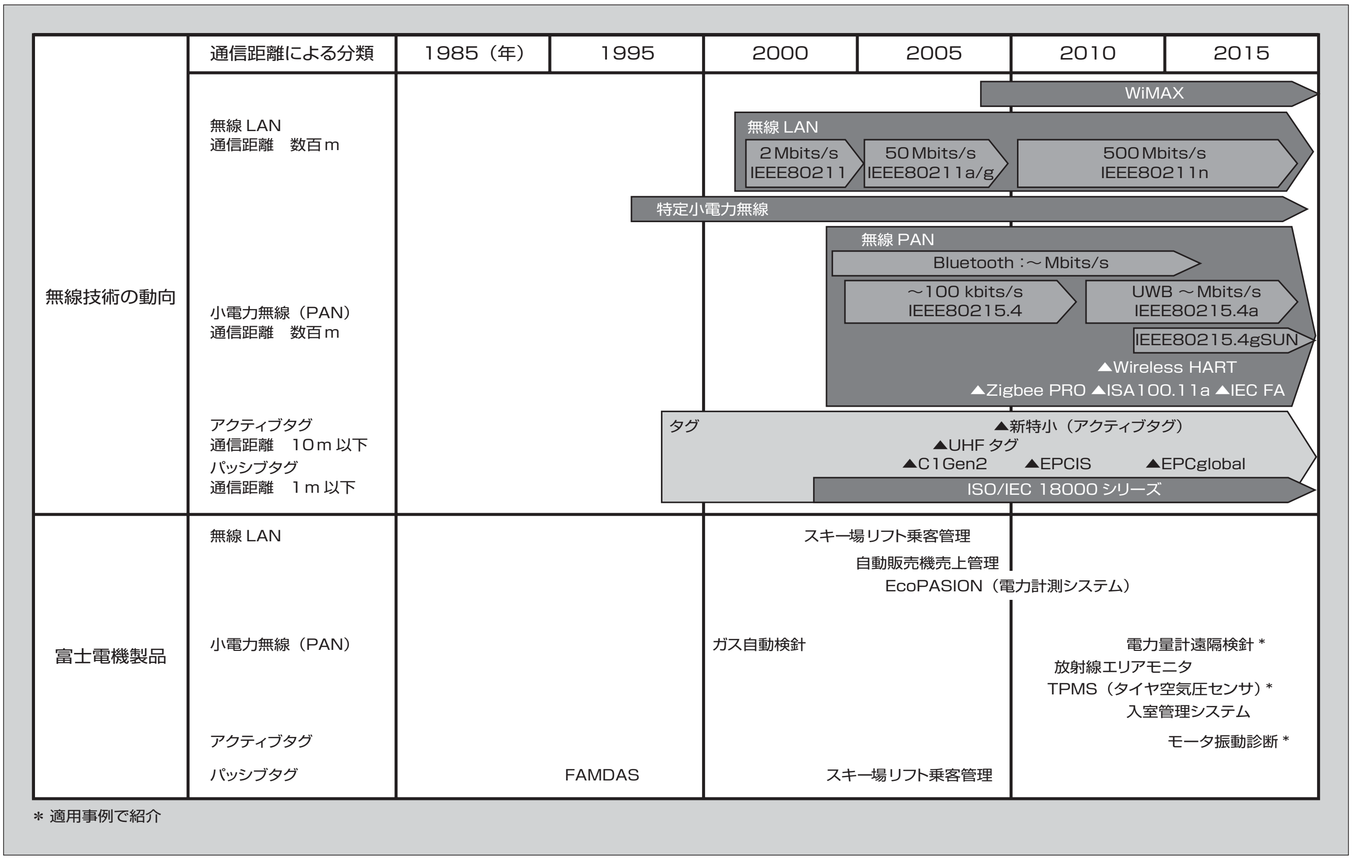


図 2　ISA100 Expo 2008 での相互接続デモンストレーション

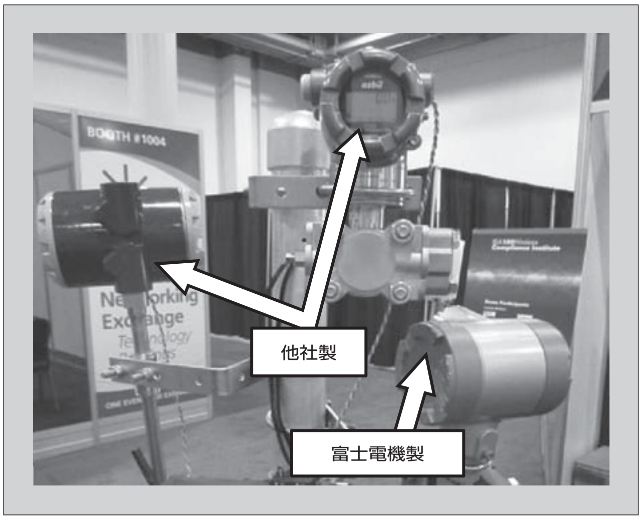
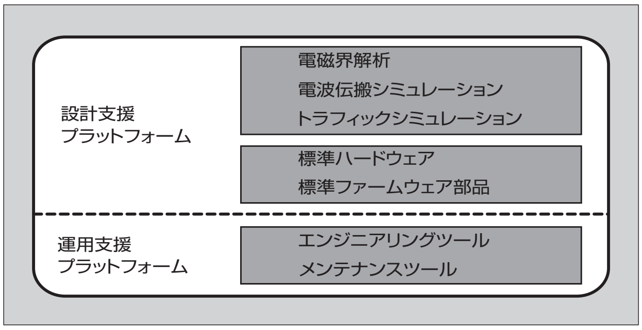


図 3　無線技術プラットフォーム



との間で ISA 100.11a の通信規格による相互接続デモンストレーションを行った。

2. 2　IEEE 802.15.4gSUN への取組み

IEEE 802.15 は近距離無線通信 PAN（Personal Area Network）の国際規格であり，IEEE 802.15.4[(4)] はその中でも比較的伝送レートの低いものを対象としている。主にデジタル家電機器などに使われる ZigBee[(5)] では下層に本規格を採用している。

従来は民生用目的が主であったが，現在 1EEE 802.15.g においてメータ検針も含む SUN（Smart Utility Networks）を対象にした規格化が進められており，富士電機は実績のあるメッシュネットワークに適したアクセス方法を，1EEE 802.15.g へ提案[(6)]している。

3　無線技術プラットフォーム

富士電機では，無線製品の開発納期の短縮や現場調査の精度向上，トラブルの早期解決を目的として，無線技術を共通プラットフォーム化して整備している。

無線技術プラットフォームは**図 3** のような構成となっている。

3. 1　設計支援プラットフォーム

開発期間を短縮し，信頼性を向上するために，各種の設

図 4　エンジニアリング・メンテナンスツール

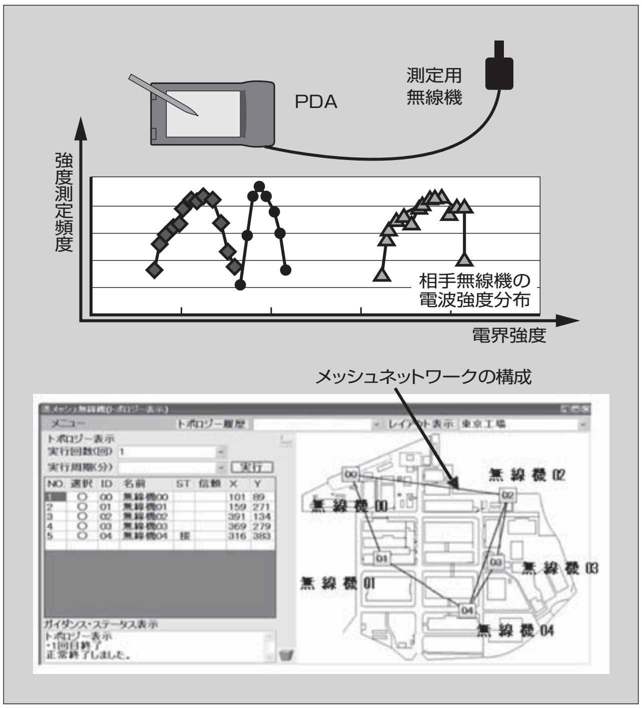
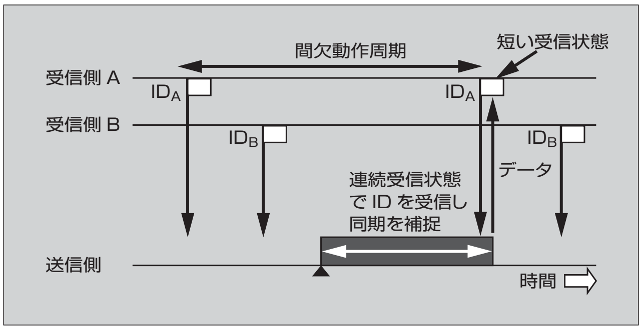


図 5　受信駆動型無線アクセス方式



計ツールを整備した。アンテナ設計のための電磁界解析や，電波伝搬シミュレーション，ネットワークのトラフィックシミュレーションなどのツールがある。

これらのツールを有効活用することで，試作して測定することなしに目標性能が得られていることが確認可能であり，開発工程を短縮することができる。

また，標準ハードウェア・ファームウェア部品をプラットフォーム化して用途に応じてカスタマイズすることで，開発期間の短縮を図っている。

3.2　運用支援プラットフォーム

ワイヤレスネットワークは，空間を通信路とするため周囲環境の影響を受けやすく，障害物の遮蔽（しゃへい）や反射波による干渉によって通信できないことがある。

設置前に周囲環境の影響を調査したり，トラブル発生時にシステムの状態を調査して問題点を解消するために，エンジニアリング・メンテナンスツールを開発した。

図 4 にツール画面例を示す。ノイズ計測，通信相手の電波強度測定ツールと，メッシュネットワークのネットワーク構造を分析するためのツールとがあり，測定用無線機に PDA（Personal Digital Assistants）を接続して結果を表示することができ，周囲環境の状態やシステムの問題点を，測定用無線機と PDA だけを用いてその場で判断できるようにしている。

4　特徴のある無線技術

富士電機の特徴のある無線技術として，メッシュネットワーク技術と多数タグ読取り技術を紹介する。これらは無線技術プラットフォーム開発の一環で考案したものである。

4.1　低消費電力メッシュネットワーク

富士電機では，無線機が中継しながらデータを転送するメッシュネットワークを，これまでに自動販売機の売上管理システム[7]や電力計測システム[8]などに適用し，配線を行うことなく設備のデータを収集するシステムを提供してきた。特長は，データの転送ルートを転送時点に決定するルーティング方式としたことにより，データを転送できない無線機があっても別のルートを使って目的の無線機まで転送できることである。

このようなメッシュネットワークを構成する無線機は，従来はライン電源で常時動作していたが，配線不要とするために電池だけで動作できる受信駆動型のアクセス方式[9]を開発した。

受信駆動型無線アクセス方式を**図 5** に示す。本アクセス方式では，連続受信によって間欠送信される ID（無線機ごとにユニークな識別符号）を受信すると，それに続く短い受信状態をめがけてデータを送信する。データ送信後は休止状態に遷移する。受信駆動型無線アクセス方式によると連続受信の途中でデータを送信し動作を終了するため，従来の送信駆動型が一定時間送信状態であったのに対して連続動作時間が短くなり，データ転送に伴う消費電流を半減することができた。さらに，メッシュネットワークの特徴である送信相手が多数存在することや，ID を受信すれば普段通信できない相手にもデータを転送できる独自のルーティング方式と組み合わせて，消費電力を従来方式の 1/5 ～ 1/10 にできることをシミュレーション[10]によって確認している。

4.2　多数タグの読取り技術

一般的な RFID タグは送信機能だけ持っており，一定間隔でデータを送信する。多数のタグを一台の受信機で受信しようとすると，電波が衝突して受信できないタグが発生する。

例えば信号の送信間隔に対して電波を出している時間が 1/1000 のとき，100 個のタグの信号は 10 回に 1 回は衝突してエラーとなる。

今回，受信機に複数チャネルの信号を同時に処理する機能を持たせ，タグが信号を送信するごとにチャネルを変えるとエラー率が大幅に改善することを確認した。

図 6　多数タグ読取り

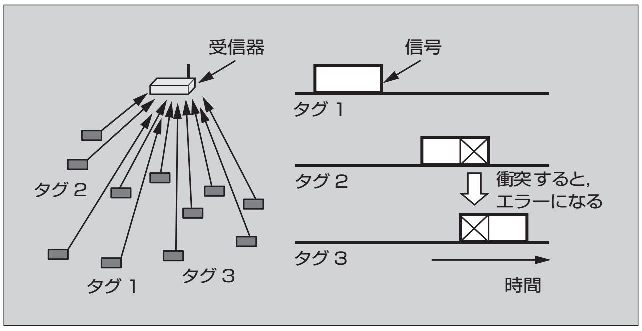


表 2　複数チャネルを使ったときの受信率改善

使用チャネル数	エラー率（%）
1 ch	18.54
2 ch	0.901
3 ch	0.02

図 7　電力量計の無線遠隔検針システム

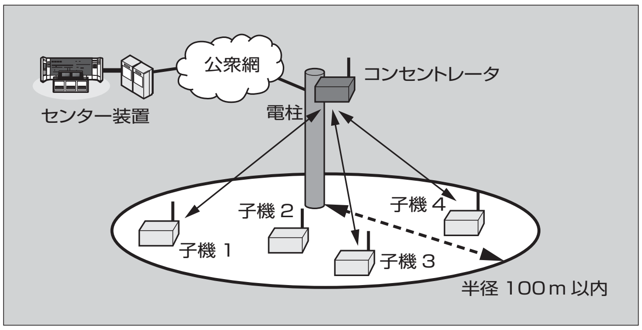


表 2 はチャネル数を増やしたときのエラー率の変化である。例えば 100 個の製品につけたタグの信号を受信するとき，従来は 1 回の読取りに対して 18 回の読落しがあったものが，本方式を採用し使用チャネルを 3 とした場合，50 回の読取りに対して 1 個の読落しに改善できた。倉庫の物品管理のように多数のタグを読む必要がある用途で，読取り性能の向上が図れる。

5　ワイヤレスネットワークの適用事例

5. 1　自動検針への適用例

図 7 は電力量計の無線遠隔検針システムの構成図である。一般需要家のメータに無線子機を接続し，半径約 100 m のエリアごとに公衆網に接続されたコンセントレータと呼ばれる無線機を設置する，コンセントレータを経由して遠隔のセンター装置からメータの検針値を収集する。

コンセントレータは通信の遮蔽が少なくなるように，電柱など比較的高い位置に設置する。それでも直接通信できない無線子機と通信するために，最大 2 段まで中継できるようにしている。

電力量計とは異なり，ガスメータや水道メータでは電源を確保することができない。このような用途には，**4. 1** で説明した電池駆動のメッシュネットワークを適用する。

図 8　モータ振動診断システムの構成

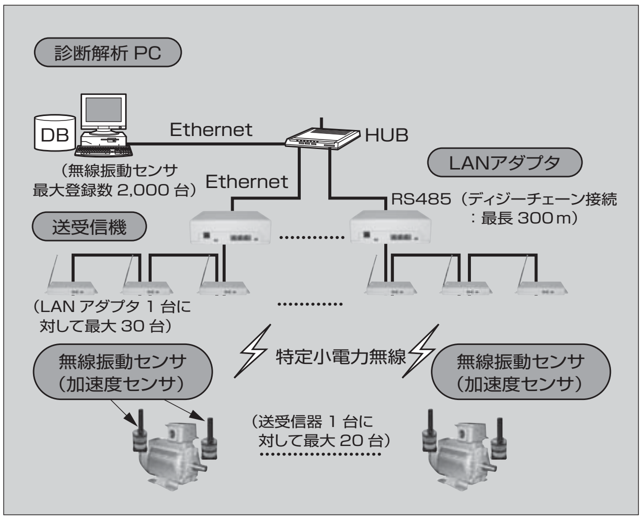
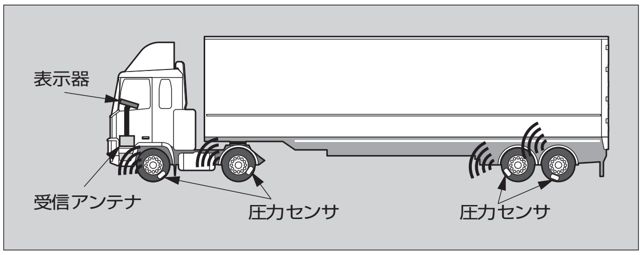


図 9　TPMS 構成



5. 2　保全診断への適用例

富士電機では，センサと無線を組み合わせたシステムを多数製品化している。タグ型モータ振動診断システムは，設備で使用されているモータに無線付きの加速度センサを取り付け，モータの振動状態を解析することで異常を早期に発見するためのシステムである。タグに垂直・水平方向の加速度センサを内蔵しており，監視用のパソコンからの起動で，モータ振動のデータをサンプリングして収集する。収集したデータを解析ソフトウェアで FFT 処理することによって異常振動を診断することができる。

図 8 にモータ振動診断システムの構成を示す。電源接続が困難な場所へも取付け可能なようにコイン電池で動作し，電池寿命は週 1 回の測定で約 2 年間である。

5. 3　監視システムへの適用例

監視システムとしては，センサと無線を組み合わせたシステムを製品化している。

放射線センサと無線を組み合わせて，放射線取扱い施設の放射線管理区域からの入退場時に作業者の放射線被ばく量などを無線で読み取る放射線管理システムや，放射線管理区域内特定エリアの放射線量をリアルタイムで測定し作業者の安全に貢献するエリアモニタリングシステムなどがある。

ここでは，タイヤ圧力センサ（TPMS：Tire Pressure

Monitoring System）について紹介する。これは自動車のタイヤ内部に取り付けた圧力センサで空気圧を監視するタイヤ空気圧監視システムであり，空気圧低下を検出すると運転席付近に設置した表示器で警報を発する。目的は，タイヤ空気圧の低下によるパンクなどの事故防止や燃費の低減防止である。特に高速道路などでは，パンクが重大事故に直結するため，空気圧の監視は重要な点検項目となる。

TPMSの構成例を**図9**に示す。圧力センサはタイヤ内に設置されるため無線通信が必須となる。金属構造物が多い環境下で通信の品質が低下するため，300 MHz帯の電波の回り込みを利用し，アンテナの効率向上により通信品質を上げている。また，電池駆動で長寿命とするために，低消費電力のセンサ採用やソフトウェア処理により，電池寿命を4年とすることができた。

富士電機は横浜ゴム株式会社向けにTPMSを提供している。現在は主に業務用のトラックなどで採用が始まっているが，今後，個人の乗用車への普及が想定され，よりいっそうの小型化，長時間駆動，低価格化が求められる。

6　あとがき

富士電機の無線技術への取組み，特徴のある技術とその適用事例を紹介した。

従来は，即時性を求められない検針や保全に適用してきた無線技術を，今後は即時性や高い通信品質が求められる監視・制御の分野への適用を目指して高度化していく所存である。また，エネルギーハーベストやMEMSワイヤレスセンサなどの新しい技術を開拓しながら，特徴のある技術を核にお客さまのニーズを満足するワイヤレスネットワーク製品を提供していく所存である。

参考文献

(1)　新誠一. 計測制御のための無線通信技術の現状と展望. 計測と制御. 2009-07-27, vol.48, no.7, p.537-541.
(2)　戸辺義人. 無線センサネットワークの技術動向. 電子情報通信学会論文誌B. 2007, vol.J90-B, no.8, p.711-719.
(3)　The ISA100 Standards Overview & Status. http://www.isa.org/Content/Microsites1134/SP100,_Wireless_Systems_for_Automation/Home1034/ISA100_Overview_Oct_2008.pdf,（参照 2009-07-02）.
(4)　IEEE802. 15. 4-2006 Part 15. 4. Wireless MAC and PHY Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks（WPANs）. 2006.
(5)　Zigbee Alliance HP. http://www.zigbee.org/,（参照 2009-07-02）.
(6)　IEEE802.15.4g提案ドキュメント. https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/09/15-09-0285-00-004gmac-and-phy-proposal-for-802-15-4g-for-smart-utility-networks,（参照 2009-07-02）.
(7)　杉野一彦. 無線を利用した自動販売機システム. 富士時報. 2000, vol.73, no.6, p.326-329.
(8)　安東伸彦ほか. フレキシブル無線ネットワークによる「総合エコ監視ステム」“EcoEASIEST”. 富士時報. 2000, vol.73, no.6, p.337-341.
(9)　畠内孝明ほか. メッシュネットワークの周辺無線機数と通信マージンに関する検討. 2007年電子情報通信学会通信ソサエティ大会. 2007. 講演番号B-21-22.
(10)　小南大智ほか. 受信端末始動型間欠動作データ転送方式の性能評価. 電子情報通信学会. IN研究会IN2008-155. p.139-144.
(11)　畠内孝明ほか. メッシュネットワークのためのポーリングによる低消費電力型アクセス方式の提案. 電気学会論文誌C. 2008, vol.128, no.12, p.1761-1766.

畠内　孝明

無線機，無線システムの研究開発業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部制御技術センター主査。電気学会会員，電子情報通信学会会員。

小林　芳邦

電力会社向け自動検針機器の開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部制御技術センター制御システム部主任。電気学会会員。

町田　潤一

各種コンポーネント設計業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社オートメーション事業本部東京工場ファインテック機器部。電気学会会員。

インテリジェント化を支える MEMS センサ

MEMS Sensor Technologies for Intelligential Systems

相馬　伸一 Shinichi Souma　　矢尾　博信 Hironobu Yao　　武居　正彦 Masahiko Takei

富士電機では 20 年以上にわたり，システムを差別化する MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術を応用したセンサなどの製品化を推進してきた。MEMS 応用製品には圧力センサ，フローセンサなどがあり，プラズマエッチングや陽極接合技術を応用して三次元加工を行っている。最新の事例として，超低消費電力を実現する薄膜ガスセンサと，設備や建築物などの診断応用を視野に振動センサを開発している。さらに国家プロジェクトである BEANS に参画し，抗体などを表面修飾したセンサの研究やエネルギーハーベスティング技術などを大学と共同で研究している。

For over 20 years, Fuji Electric has advanced the commercialization of sensors and other products that utilize MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）technology to realize superior systems. Products utilizing MEMS technology include pressure sensors, flow sensors and the like, and plasma etching and anodic bonding technology are used to perform three-dimensional processing. Recent development examples include a thin-film gas sensor that realizes ultra-low power consumption and a vibration sensor that is being considered for diagnostic applications to equipment and buildings. Additionally, Fuji Electric is participating in the planning of the Japanese national project known as BEANS（Bio Electromechanical Autonomous Nano Systems）, and is collaborating with some universities to research sensors such as surface-modified antibodies, and energy harvesting technology.

1　まえがき

MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術は近年急速に発展してきており，研究機関やさまざまな分野の企業が，製品のキーデバイスとして研究開発を推進している。各種 MEMS 関連分野に対する MEMS の国内市場規模予想[1]を**図 1** に示す。自動車関連分野および情報通信機器関連分野における MEMS センサやアクチュエータの市場が拡大すると予測されている。また，医療福祉関連分野や精密機器関連分野などで，バイオ MEMS や光・RF-MEMS などの異分野の技術と融合したデバイスの開発が盛んになってきている。

MEMS 技術について，経済産業省より**図 2** に示すような技術戦略マップ[2]が提案されている。今後の MEMS 技術は，環境，安全，エネルギー分野への応用が期待され，環境監視デバイス，エネルギーハーベスティング，医療機器への応用のための研究が進むと思われる。

MEMS 技術も複雑化してきており，各企業とも研究機関や異業種企業との共同研究により，互いの強い技術で相互補完を行っている。富士電機もパートナーとの相互補完によって，エネルギー，環境，安全・安心の分野への MEMS 技術の応用として，環境監視用デバイス，エネルギーハーベスティング用デバイス，医療機器用デバイスなどの開発に取り組んでいる。さらに MEMS センサと無線技術とを組み合わせて，オートメーションシステムのインテリジェント化を推進していく。

以下に富士電機の MEMS 技術と，現在の MEMS 応用製品事例と最新の事例とを紹介する。またインテリジェントシステムの事例として無線による設備監視システムを紹介し，今後の取組みの方向についても言及する。

2　富士電機の MEMS 技術と現在の MEMS 応用製品

富士電機は 20 年以上にわたってシステムを差別化する

図 1　各種 MEMS 関連分野の市場規模予想（国内）[1]

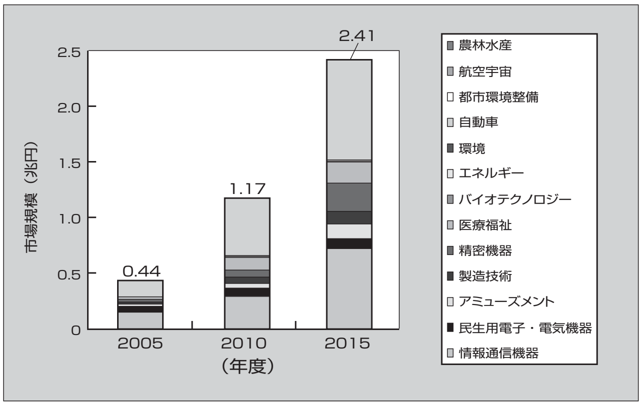
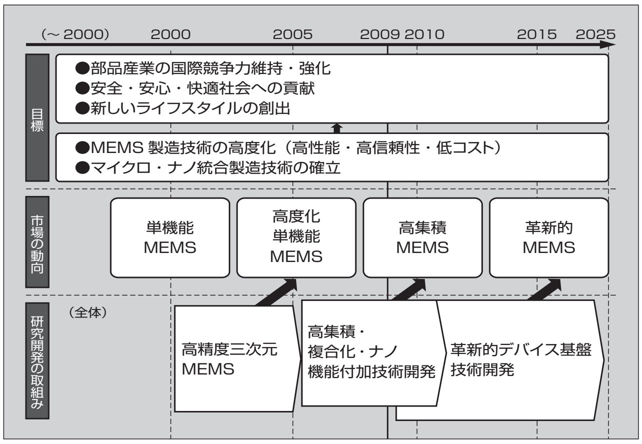


図 2　MEMS 技術の動向



MEMS 技術を応用したセンサとアクチュエータの製品化を推進してきた。オートメーションシステムに使用される発信器用圧力センサ，各種システムの計測データの記録に使用する記録計用インクジェットヘッド，放射線管理システムに使用する個人被ばく線量計用 RI（Radio Isotope）センサなどの製品である。いずれの製品もシステムを支えるコンポーネントの差別化のために開発し，特徴あるデバイスとなっている。**図 3** に圧力センサがセンサモジュールとして発信器に組み込まれ，システムのインテリジェント機能として使われていることを示す。

富士電機の MEMS 製造技術について**表 1** に示す。三次元加工にはプラズマエッチングや陽極接合技術などを駆使している。

これらの MEMS 技術を応用している製品[3]を**図 4** に示し，以下に概要を紹介する。

2.1　広レンジタイプ圧力センサ

発信器用圧力センサの構造図を**図 5** に示す。両面に作用する圧力の差によりシリコン（Si）ダイアフラム部が変位し，その変位を静電容量の変化より検出することで圧力（差圧）を計測する。ここで Si ダイアフラム部の厚さを変えて，各種の圧力の測定レンジに適合できるような製品設計を行っている。

圧力センサは，富士電機の MEMS 加工技術におけるコア技術として，三次元形状を高精度で加工するバルクマイクロマシン技術で形成している。例えばダイアフラム部は，プラズマエッチングによりシリコン基板を両面加工することによって厚さ精度 ± 1 μm を実現している。この精度が圧力センサの検出感度を向上させ，発信器の小型化と高精度化でシステムの差別化を可能としている。

また，1 チップ上に複数個のセンサを加工・形成することで，1 チップで 6 〜 130 kPa までの範囲が測定できる広レンジタイプの圧力センサを実現した。本センサにおいては前述のプラズマエッチング技術に加えて陽極接合技術を適用し，信頼性の高い構造を実現している。

2.2　フローセンサ

工業用赤外線式ガス分析計に使用するガラス基板を素材としたヒータ式フローセンサである。素材として熱伝導率の低いガラスを採用し，MEMS 技術によって微細な配線を形成することで高感度化を実現している。例えば分析ガス CO を 2 ppm 濃度までの計測を可能とするなど，分析計の高性能化に貢献している。また本センサを応用して，クリーンルーム内の気流（向きと流速）を計測して環境監視にも利用している。

2.3　シリコンインターポーザ

シリコン基板上に配線，抵抗・コンデンサなどの受動素子を作りこんだインターポーザである。通常のプリント基板に比べて約 1/4 までサイズが小型化できるため，電子機器やセンサ素子基板のマザーボードとして利用されている。最大の特徴は多くのセンサで用いるシリコンを基板材料としていることである。熱応力の低減によるセンサ素子の温度特性改善や，基板配線長の短縮による電子回路のノイズ低減などの効果で搭載するセンサ素子の性能を十分に発揮できる。ノイズ低減では S/N 比 30% 向上を実現している。このシリコンインターポーザを適用することによって，コンポーネントの小型化や特性向上といった差別化が可能となるため，システムを支える重要な技術として応用を進め

図 3　システムを支える MEMS 製品

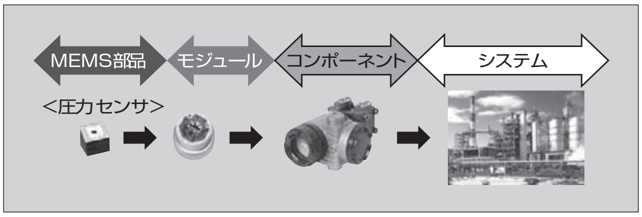


表 1　富士電機の MEMS 製造技術

技術分類	詳　細
フォトリソ技術	レジスト塗布（スピンオン，スプレー，ドライフィルム） 露光（片面，両面同時，裏面アライメント）
熱処理技術	熱酸化膜形成，不純物拡散
成膜技術	PVD（蒸着，スパッタ） CVD（TEOS）
エッチング技術	ドライエッチング（ICP，RIE，プラズマ） ウェットエッチング（シリコン，金属）
機械加工技術	切断（ダイシング，スライシング）
接合技術	ウェーハ接合（陽極接合，拡散接合） ベアチップ実装（ワイヤボンディング，フリップチップ）
評価技術	電気特性評価，膜厚評価，形状評価

図 4　富士電機のＭＥＭＳ応用製品

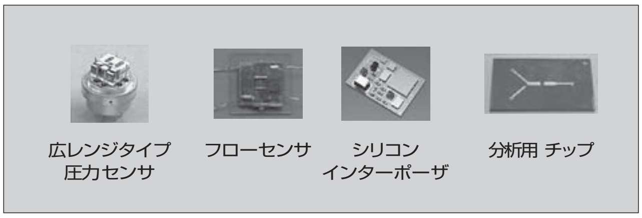
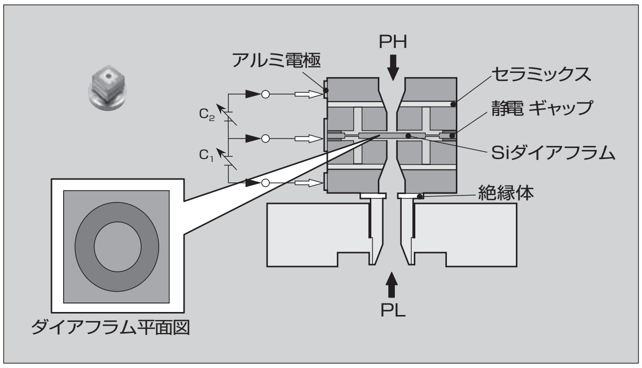


図 5　圧力センサ構造図



特集

ている。

2. 4　分析用チップ

化学・バイオ分野での環境化学物質の分析用途として，シリコン加工による薬液流路を形成した分析用チップを研究用に開発した。

この MEMS チップでは，測定対象となる試料は，標準物質を含め 4 種類，分析用の試薬は 2 種類を同時に反応させることができる。素材はシリコンとガラスを使用し，シリコンの表裏両面それぞれに，送液，混合，反応場のための流路をエッチングにより形成している。流路寸法は，幅 200× 深さ 200（μm），および幅 400× 深さ 100（μm）である。**図 6** にチップ外観を示す。対象物質の特定・定量は，チップ内で蛍光反応などにより測定する方法のほか，チップと接続した質量分析装置により行うこともできる。

MEMS によるチップを分析の反応場として利用することによって，各試料，試薬の量や，反応温度を同条件にそろえることが容易となり，分析精度が向上できる。分析用チップの利点として，反応速度の高速化やこれまでは不可能であった微量の分析が行えるなど，さまざまな用途の広がりがある。今後の富士電機の MEMS 製品において，重要な役割を果たすデバイスと位置付けている。

2. 5　インテリジェント化への貢献

富士電機は，電力，産業，水処理など，さまざまな分野においてシステム製品を提供している。MEMS センサは，それらのシステムの至るところで使われており，時々刻々の状態変化を正確に把握するという重要な役割を持っている。制御システムにおけるフィードバック制御などでは，その制御の精度はセンサの精度により決定付けられ，システムのパフォーマンスにそのまま影響を与える。システムの正常な運転の維持のために，MEMS センサには高い信頼性と長期の安定性が求められる。富士電機では従来からこれらの要求に応え，システムのインテリジェント化を支えてきた。後述するように，最近ではさらに無線技術と MEMS センサとを組み合わせたインテリジェント化にも取り組んでいる。

3　最新の MEMS センサの事例

3. 1　薄膜ガスセンサ

宿泊施設や民家などの建屋内の安全・安心のために，ガス漏れを検知するガス警報器に使用されるメタンガスセンサの開発に取り組んでいる。本センサの特長は MEMS 技術による小型化・超低消費電力化である。微細加工技術の適用により**図 7** に示すようにシリコン基板上に SiO_2/Si_3N_4 ダイアフラムを形成し，そのダイアフラム上に薄膜形成技術により，**図 8** に示す薄膜ヒータ，酸化すず膜，触媒層を形成した。このような微細な三次元構造とすることで，センサ部の熱容量を低減しかつ熱絶縁性の良い構造としている。薄膜ヒータによる局所・短時間加熱を行うことで応答性が良く（400℃，数十 ms），従来製品の数千分の一という超低消費電力化を実現している[(4)]。

本センサの測定原理は従来のガスセンサと基本的には変わらないが，MEMS 技術（微細加工技術，薄膜形成技術）を適用することにより高性能高品質な超小型のセンサを大量に生産することができる。

従来，ガス警報器は AC 電源を必要としていたが，ガスセンサの超低消費電力化によって，電源配線の不要な電池駆動が実現する。さらにガス警報器だけでなく，さまざまな場所で使える持運び可能なガス検知器への応用も可能である。また，無線技術と組み合わせれば，将来的にはユビキタスセンサネットワークの構築が実現できて，さらなる安全・安心な社会・環境の実現に貢献できる。

図 6　分析用ＭＥＭＳチップ外観

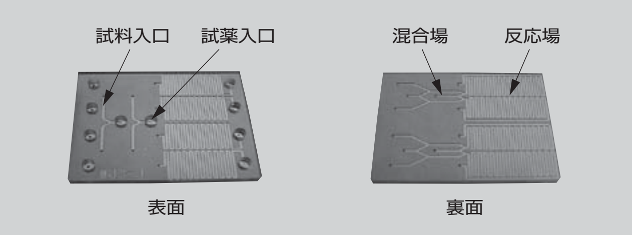


図 7　MEMS メタンガスセンサ

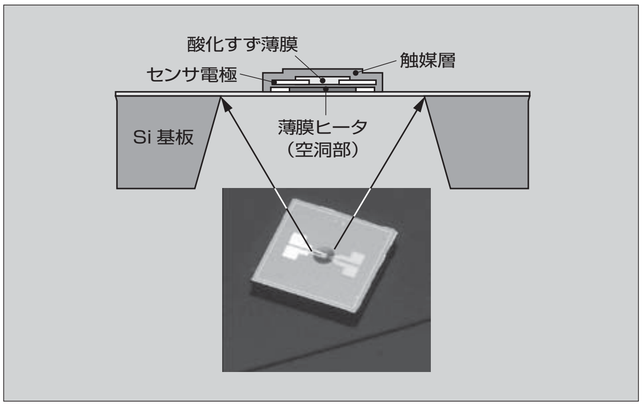


図 8　センサ断面の SEM 写真

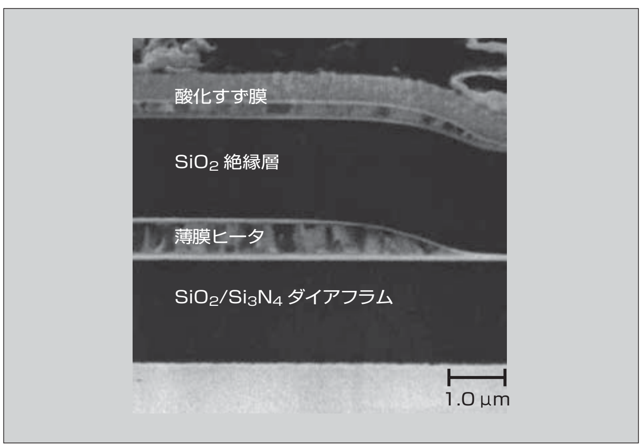
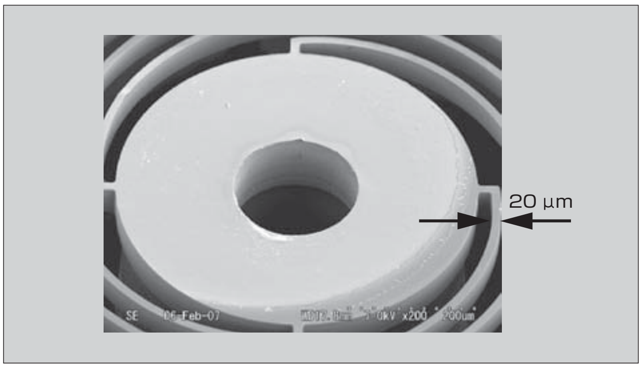


図 9　加速度センサ



3. 2　振動センサ

設備や建築物などの異常や異常兆候の検出，健全性の診断などを行うために振動の測定ニーズがあり，MEMS 技術を応用した振動センサの開発に取り組んでいる。市販の振動センサは多くあり，適用アプリケーションにより，センサの要求仕様（周波数範囲，測定範囲，感度，大きさなど）が異なる。適用アプリケーションごとの目的に応じた振動センサを開発適用することで，より価値のあるソリューション提供が可能となると考える。MEMS の三次元加工技術を用いた加速度センサの例を**図 9** に示す。センサに MEMS 技術を適用することで小型かつ高性能を実現することができる。

4　インテリジェントシステムの実施例

MEMS 技術によりセンサ素子は小型軽量かつ低消費電力化が実現できる。これと組み合わせる回路にも高密度実装技術を適用することで，センサ全体が小型軽量化できる。この特長を，無線技術との組合せでさらに生かし，従来困難であった部位のセンシングも容易にできるようになってきた。また，電源ラインについても配線不要化の必要があるため電池駆動との組合せが多く，低消費電力が重要となる。配線不要化，低消費電力化が進展することにより，広範囲に二次元的，三次元的なセンサ配置が可能となることで，より高度なインテリジェント化が期待される。

図10 に，無線による設備診断システムの例を示す。上記のように，無線技術とセンサ技術を融合させることにより配線の不要なセンサシステムが構築できる。

今後，特にセンシングネットワークへの対応も重要課題となる。ネットワークの高速・大容量化により，センサ機能を持った端末がさまざまな場面でネットワークに接続され，自動車や産業分野に限らず，居住環境，医療，福祉，家電など広い分野で，種々の情報の伝達・収集が高度化しシステムのインテリジェント化が進展していくことが期待される。その中でセンサは，新たな情報化社会のキーパーツの一つになると考えられる。

図 10　無線による設備監視システムの例

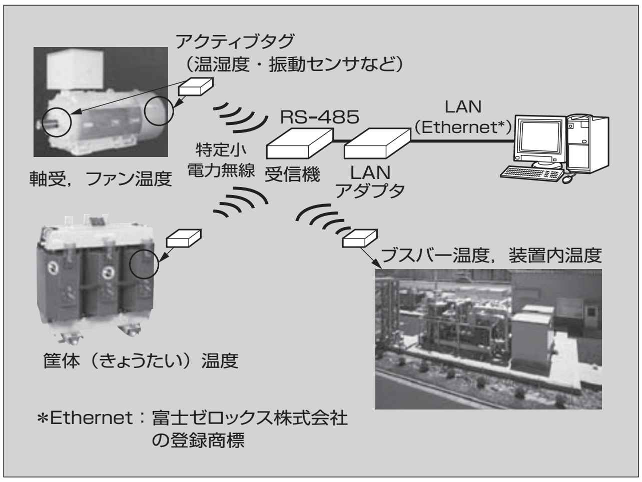
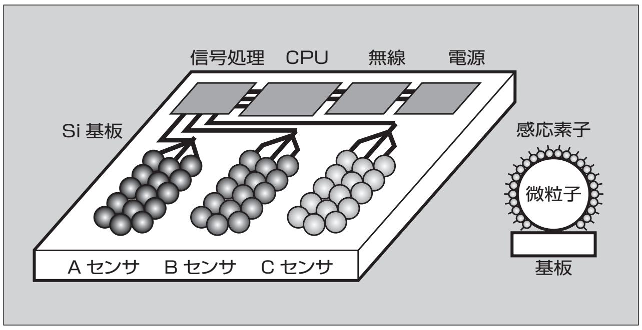


図 11　自己組織化微粒子への表面装飾を利用した多機能センサ



5　今後の取組み

富士電機は，MEMS 技術の継続的な高度化のために，国家プロジェクトである BEANS（Bio Electro-mechanical Autonomous Nano Systems：ナノ・バイオと電気機械の融合により自律分散で機能するデバイス・システム[5]）に参画し，**図11** に示す三次元加工されたデバイス表面にさまざまな抗体や官能基をナノレベルで表面修飾し，あらゆる物質の検出を可能とするセンサ開発を行っている。さらには東京大学，九州工業大学，首都大学東京などと次世代の MEMS デバイスの共同研究を推進しており，CMOS・MEMS 一体化技術やエネルギーハーベスティング技術などの先端技術開発に取り組んでいる。これらの技術は今後の富士電機を支えるコア技術になると期待している。また，MEMS センサと無線技術との組合せにより，ユビキタスセンサネットワークを構築して，システムの新しいインテリジェント化の姿を目指す。

6　あとがき

富士電機は MEMS 技術を活用して，システムのキーとなるセンサやデバイスを開発提供することで，システムのインテリジェント化を支える役割を担っていく。富士電機にとって MEMS 技術はコア技術であり，今後もパー

トナーとの共同開発により MEMS 技術の高度化を推進し，システムのインテリジェント化によって，社会の安全・安心に貢献していく所存である。

参考文献

(1) “産業動向報告書2007”. 財団法人マイクロマシンセンター . http://www.mmc.or.jp/research/market/market2007/,（参照 2009-06-30).

(2) “経済産業省技術戦略マップ2009”. 経済産業省. http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2009.html,（参照 2009-06-30).

(3) 特集2　MEMS. 富士時報. 2008, vol.81, no.5.

(4) 鈴木卓弥ほか. A micromachined gas sensor based on a catalytic thick film/SnO_2 thin film bilayer and thin film heater: Part 1: CH_4 sensing. Sensors and Actuators B. 2005, vol.109, p.185-189.

(5) “異分野融合型次世代デバイス（BEANS）製造技術開発プロジェクトの概要”. 財団法人マイクロマシンセンター. http://www.mmc.or.jp/research/beans/,（参照 2009-06-30).

相馬　伸一

MEMS，コンポーネントの企画・設計・製造業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部センサ技術センター長。精密工学会会員。

矢尾　博信

フィールド機器，特に流量計・発信器の開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部センサ技術センターグループマネージャー。計測自動制御学会会員，日本機械学会会員。

武居　正彦

MEMS 製造技術の開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部センサ技術センターグループマネージャー。応用物理学会会員。

解　説

解説 1　SIL，PFDavg，PFH，PL

■ SIL（Safety Integrity Level：安全度水準）

SIL とは，IEC 61508 においてコンポーネントやシステムの安全度（それらが持つリスク低減度合い）を表す尺度で，SIL 1 から SIL 4 まで 4 段階に定められている。SIL が高いほど，安全度が高い。それぞれの SIL には目標とすべき PFDavg または PHF が示されている。SIL 2 の場合，安全機能が喪失する故障が発生する確率は，100 〜 1,000 回の作動要求あたり 1 回以下でなければならない。

■ PFDavg（average Probability of Failure on Demand：作業要求時の機能失敗平均確率）

PFD とは，安全機能を作動させせようという要求に対してコンポーネントやシステムが機能を実行できない（危険側に故障している）確率である。PFD は，コンポーネントが持つ故障率をベースに算出され，使用時間の経過とともに値が大きくなり，定期検査によって値はリセットされ，これを繰り返す。

プロセス産業などで使用される低頻度作動要求モードでは，ある時間までの平均値として，PFDavg が適用される。

■ PFH（Probability of dangerous Failure per Hour：時間当たりの危険側故障発生確率）

PFH とは，コンポーネントやシステムが単位時間当たりに危険側故障を引起す平均確率である。安全システムへの作動要求が時間当たりや 1 日当たりに何回という高頻度作動要求モードのシステムに適用される。

■ PL（Performance Level：パフォーマンスレベル）

PL は，ISO 13849-1 の中で規定されており，安全機能を実行する安全関連部（機械の安全機能を実行する部分）が持つ能力を特定するための分類である。時間当たりの危険側故障発生の確率として表現する。PL は，a から e までの 5 段階で，e が一番高い信頼性を表す。SIL と対応させることができる。

解説 2　冗長化設計

冗長化設計とは，一つのコンポーネントが機能を失ったときでも，他の一つが同じ機能を確保する目的でコンポーネントやシステムを二重化することで全体の信頼度を上げることである。

冗長化設計によるコンポーネントやシステムに対する故障への強さは，HFT（Hardware Fault Tolerance：ハードウェア故障許容）という指標で表せる。HFT はハードウェアに一つ以上の危険側故障が生じた場合でも，コンポーネントまたはサブシステムに要求される安全機能を継続して行う能力の指標である。HFT が n とは，$n+1$ の故障で，システムの安全機能が失われることを意味する。

HFT は式(1)で計算できる。

$$\mathrm{HFT}=N-M \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，N はコンポーネントの全体数，M は必要な正常なコンポーネント必要数であり，安全状態の実現には，N 個のうち M 個のコンポーネントが正常に働かなければならないことを意味する。

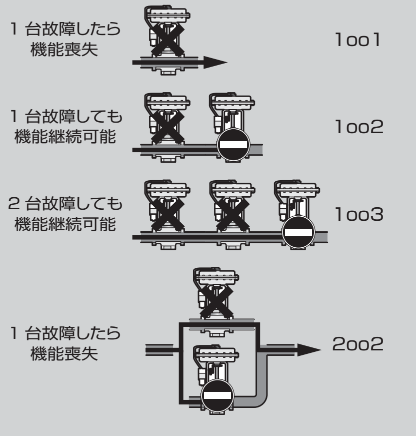
このような構成を Moo$N$（N 個のうち M 個：M out of N）と表記する。例えば，1oo3 の構成（コンポーネントの全体数が 3 個で，必要な正常なコンポーネント数が 1 個）では次式の計算により HFT は 2 となる。

$$\mathrm{HFT}=N-M=3-1=2$$

Moo$N$ と HFT の関係は図に示すとおりである。

図 1　Moo$N$ と HFT の関係

Moo$N$	HFT
1oo1	0
1oo2	1
1oo3	2
2oo2	0



主要事業内容

電機システム部門

富士電機システムズ株式会社
富士電機機器制御株式会社

ドライブ分野［駆動制御，駆動システム，電源，車輌・特機］，**オートメーション分野**［センサ，計測機器，コントローラ，製造ソリューション，エネルギーソリューション，ソシオソリューション］，**産業プラント分野**［産業電源，施設電機，電鉄用変電，クリーンルーム］，**発電プラント分野**［火力，原子力，水力］，**工事分野**［電気設備工事，空調，給排水工事］，**器具分野**［電磁開閉器，マニュアル・モータ・スタータ，操作表示機器，配線用遮断器，漏電遮断器，高圧真空遮断器，低圧・高圧ヒューズ，ガス警報器，エネルギー管理機器］

電子デバイス部門

富士電機デバイステクノロジー株式会社

半導体デバイス［パワー MOSFET，電源制御 IC，IGBT モジュール，IGBT-IPM，整流ダイオード，圧力センサ］，**ディスク媒体**［アルミ媒体，ガラス媒体，アルミ基板］，**画像デバイス**［感光体，画像周辺機器］

リテイルシステム部門

富士電機リテイルシステムズ株式会社

自動販売機［各種自動販売機］，**フードサービス機器**［各種ディスペンサー，自動給茶機，冷蔵ショーケース］，**通貨機器**［硬貨識別装置（コインメカニズム），紙幣識別装置（ビルバリデータ），両替機，つり銭自動支払機，遊技場向け通貨関連機器，非接触 IC カードシステム］，**コールドチェーン機器**［店舗用各種ショーケース，店舗関連機器，店舗設計施工・保守］

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。

富士時報	第 82 巻　第 5 号	平成 21 年 8 月 30 日 印刷 平成 21 年 9 月 10 日 発行 定価 735 円（本体 700 円・送料別）
編集兼発行人	重　兼　壽　夫	
発行所	富士電機ホールディングス株式会社 技術戦略室	〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号 （ゲートシティ大崎イーストタワー）
編集室	富士電機情報サービス株式会社内 「富士時報」編集室	〒191-0065 東京都日野市旭が丘一丁目 9 番 4 号 電話（042）585 − 6965 FAX（042）585 − 6539
印刷所	富士電機情報サービス株式会社	〒191-8502 東京都日野市富士町 1 番地 電話（042）587 − 5555
発売元	株式会社 オーム社	〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地 電話（03）3233 − 0641 振替口座 東京 6 − 20018

Ⓒ 2009 Fuji Electric Holdings Co., Ltd., Printed in Japan（禁無断転載）

e-Front runners

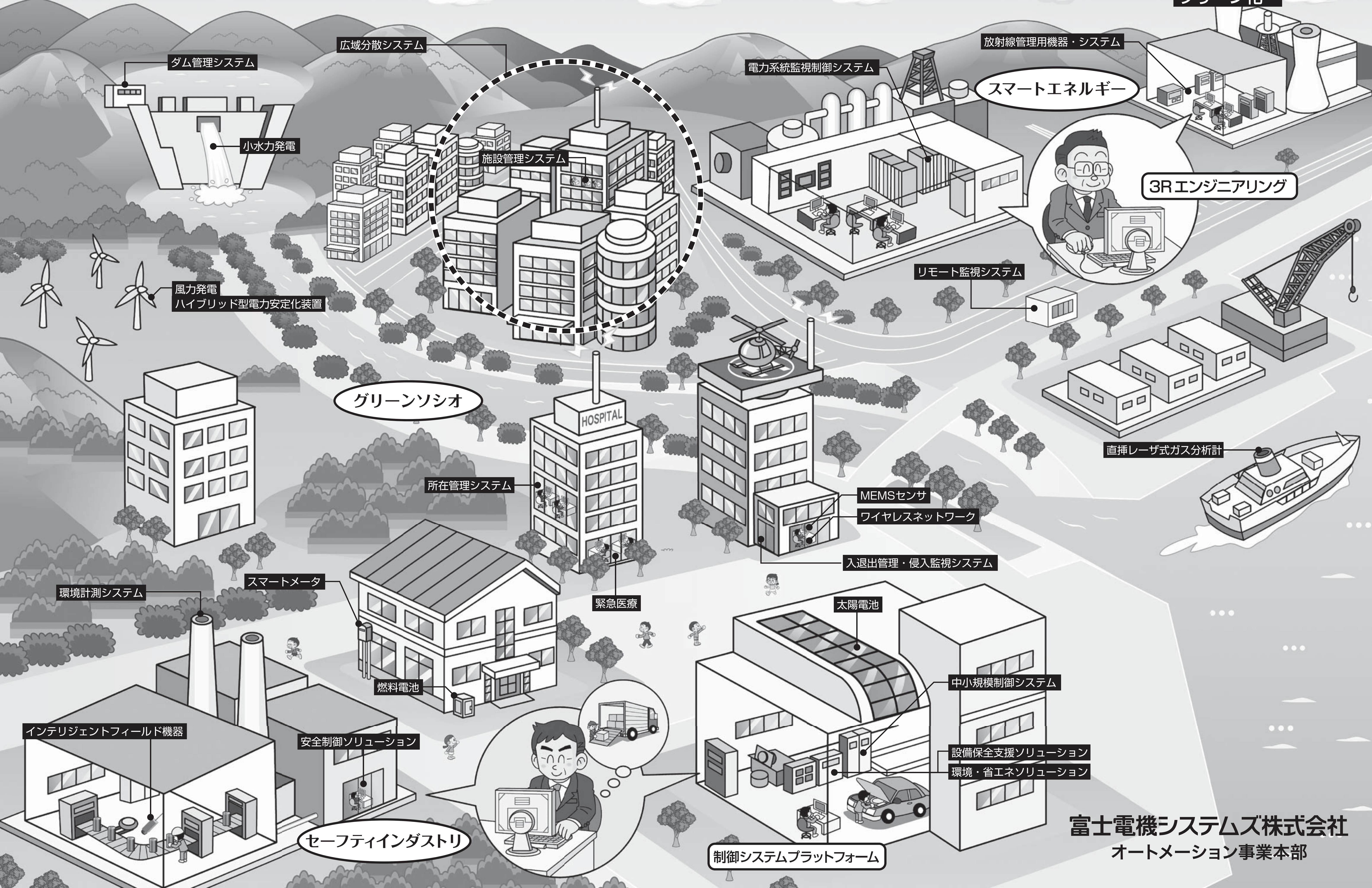
みんなのe顔つくりたい。
e-Front runners

私たちは、それぞれの分野で最先端をめざす e-Front runners。
地球環境(environment)と調和しながら、
豊かな社会づくりのために(enrichment)、
たゆまぬ進化(evolution)を続けます。
富士電機グループの一人ひとりが、「e」の最前線を走りながら
豊かで、明るい社会づくりに貢献します。

富士電機

エネルギーと環境・安全に貢献する　オートメーション技術

3つの鍵
スマート化
セーフティ化
グリーン化



富士電機システムズ株式会社
オートメーション事業本部

昭和40年6月3日　第三種郵便物認可　平成21年9月10日発行（年6回1，3，5，7，9，11月の10日発行）富士時報　第82巻　第5号（通巻第858号）

e-Front runners

本誌は再生紙を使用しています。

雑誌コード 07797-9　　定価 735円（本体 700円）